



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

**VEGETACIÓN DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN
DURANTE EL PERIODO INTERGLACIAL MIS7:
EVIDENCIAS DEL NÚCLEO PI-7, LAGO PETÉN-ITZÁ**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
B I Ó L O G O
P R E S E N T A
JUAN CARLOS BELTRÁN MARTÍNEZ

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. Y. Alexander Correa Metrio
México, 2015.**



Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

El presente trabajo se realizó en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la dirección de:

Dr. Y. Alexander Correa Metrio

El Comité revisor estuvo conformado por:

Dr. José Daniel Tejero Diez

Unidad de Morfofisiología y Función, FES Iztacala, UNAM

Dra. Socorro Lozano García

Instituto de Geología, Ciudad Universitaria, UNAM

Biól. Arnulfo Reyes Mata

Mapoteca, FES Iztacala, UNAM

Dr. Francisco Sánchez Beristain

Laboratorio de Paleontología, Facultad de Ciencias, UNAM

Contó con el apoyo económico de:

Petén-Itzá Drilling Project, dirigido por D.H. Hodell. Apoyo financiero de la concesión NSF-0902864.

Los Datos Modernos utilizados en esta tesis fueron obtenidos del Proyecto CONACYT 167621.

Beca de titulación del Instituto de Geología.

Fue presentado en:

Meeting of the Americas, de la American Geophysical Union, llevada a cabo en Mayo de 2013.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo a mi Universidad de la cual estoy muy orgulloso y que nunca dudo en recomendar a jóvenes con ilusión de estudiar. Esta Universidad me ha dado las más grandes satisfacciones, y en ella he podido realizarme en mi vida académica y personal mediante el consejo y apoyo tanto de profesores como de compañeros.

Al **Dr. Alexander Correa Metrio** por darme su confianza para poder ser partícipe de este proyecto, y por mantener esa confianza hasta el último momento. Gracias por brindarme tus conocimientos y tu escucha en momentos clave de mi vida y por las llamadas de atención que ya me han servido en otros aspectos a parte del académico.

A la **Dra. Socorro Lozano**. Gracias por revisar mi trabajo y darme el tiempo de corregirlo. Aún recuerdo su amabilidad cuando la conocí.

Al **Dr. Daniel Tejero Diez**, por revisar mi tesis y por sus conocimientos aportados a mi trabajo.

Al **Biól. Arnulfo Reyes Mata**... ¿Qué puedo decir profesor? Lo conocí en primer semestre y su clase me gustó muchísimo, admiro su pasión por la Biología y también admiro su formalidad: “recoge la tesis el viernes dentro de dos semanas...”, y ahí estaba usted con tesis en mano... y muchísimas correcciones, ¡gracias!

Al **Dr. Francisco Sánchez Beristain**, por revisar mi tesis, por ser mi profesor y por compartir una de las grandes pasiones de mi vida, la música.

A la **Dra. Susana Sosa Nájera**, por sus enseñanzas en el trabajo de laboratorio e identificación de polen, fue divertido aprender de ti.

A **todos mis compañeros de laboratorio**, gracias por los buenos momentos, por los viajes y tantas, tantas risas.

A mi familia

Quiero dedicar de manera especial este trabajo de tesis a la persona que falleció con la firme creencia de que yo terminaría una carrera, mi mamá, **Gloria**. Aquí estoy escribiendo estas palabras para ti y sé que esperaste mucho verlas. Me diste vida, confiaste en mí después de tanta lata que te di, no entendí muchas cosas de ti, y sé que tú no entendiste mi proceder en muchísimas más de mí. Sólo puedo decir que gracias a ti y a mi padre estoy logrando esto. Toda la carrera, toda la tesis y todas mis alegrías te las dedico de forma especial a ti, dadora de vida.

A mi papá, **Santiago**. El mejor ejemplo que he tenido de un jefe de familia trabajador y honesto. Gracias por estos y muchos otros ejemplos que pusiste en mi camino, como el de disfrutar de la vida de una forma sana. Gracias por llevarme en bicicleta a la primaria, uno de mis mejores recuerdos. Gracias por inculcarme el deporte y gracias por ser un gran padre: a pesar de tu trabajo y tu cansancio, tuviste tiempo para jugar conmigo y educarme. Gracias.

A mi hermana **Krys**. Me has apoyado en todo desde que era niño, aunque lo que elija no tenga sentido para los demás, te quiero muchísimo, gracias por tu ejemplo de independencia y fortaleza, independencia y fortaleza que nos hace falta a muchos hombres.

A mi hermano **Santiago**. Gracias a ti me ilusioné con el estudio profesional cuando era pequeño, gracias por el deporte y gracias sobre todo por tu influencia musical, tal vez ahora en lugar de escuchar a Pink Floyd o a J. S. Bach, escucharía banda y reggaeton.

A mis Amigos

A **Patysaurio**, mi mejor amiga y hermana, nos conocimos al finalizar el CCH, ni siquiera sabíamos que íbamos juntos. Has estado en todos los acontecimientos importantes de mi vida (buenos y malos), y este es uno más. Tú sabes de qué pie cojeo, y has aguantado toda mi inmadurez (incluyendo a Gorgoroth), yo sabía que llegaría el día en que aparecerías en estos agradecimientos, sin embargo, escribir mucho sería decir muy poco para todo lo que le has aportado a mi persona ¡gracias por todo!

A **Carlos Enrique**. Por ser mi amigo y por dejarme revivir la pasión por la música, ver la música en ti, es vivir aquello a lo que no pude acceder. Gracias.

A **Margarita Lugo**. Por tu ejemplo de orden, perseverancia y por tus consejos.

A **Elizabeth Román**. Cómo friegas, pero que divertidas nos damos con la mami.

Al **Dr. Horacio Vázquez**. Por compartir sus conocimientos y su amistad.

A la **Familia Figueroa Maya, Ana Vera, Daniela Zúñiga, Eduardo Medrano y Magda**.

A mi segunda familia

Un apartado especial para ustedes: mi padrino **Leodegario, Genaro y Norma**. Gracias por mostrarme el valor del estudio, del trabajo arduo, de la honestidad. Por las enseñanzas y llamadas de atención que no sólo me han servido en mi vida académica sino también en mi vida personal; gracias por la “beca”, mediante la cual estoy logrando terminar mis estudios, gracias por todos los momentos divertidos que hemos pasado. Espero poder seguir aprendiendo de ustedes.

Gracias también a **Pablo, Ángeles, Valiente, Brenda, Anita y Arturo**, porque trabajar con ustedes ha sido una experiencia memorable y porque pienso que con ustedes conformamos el equipo de trabajo ideal.

*A Laura J. R. R. . . Cuando hasta el más
serio de los hombres logra ser tierno y
entablar cualquier tipo de conversación. . .
¡hay que casarse con esa mujer!*

CONTENIDO

RESÚMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. MARCO TEÓRICO	5
2. 1. VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL CUATERNARIO	5
2. 1. 2. <i>Estadio Isotópico Marino 7</i>	7
2. 2. FACTORES QUE DETERMINAN EL CLIMA DE CENTROAMÉRICA	8
2. 2. 1. <i>Circulación Meridional de Retorno del Atlántico</i>	8
2. 2. 2. <i>Zona Intertropical de Convergencial</i>	10
2. 2. 3. <i>Alberca de Agua Cálida del Atlántico</i>	11
2. 2. 4. <i>Sistema de Oscilación del Sur-El Niño</i>	12
2. 3. LA PALINOLOGÍA COMO HERRAMIENTA DE RECONSTRUCCIÓN DE LA VEGETACIÓN DEL CUATERNARIO	13
2. 4. ANTECEDENTES	17
2. 4. 1. <i>Lago Petén-Itzá. Proyecto Científico de Perforación Petén-Itzá</i>	19
2. 5. OBJETIVOS	22
2. 6. HIPÓTESIS	23
3. MÉTODOS	24
3. 1. ÁREA DE ESTUDIO	24
3. 2. PROYECTO CIENTÍFICO DE PERFORACIÓN PETÉN-ITZÁ	28
3. 2. 1. <i>Protocolo y método de muestreo</i>	30
3. 3. ANÁLISIS DE DATOS	35
3. 3. 1. <i>Análisis de Correspondencia sin Tendencia</i>	35
3. 3. 2. <i>Técnica de Análisis de Análogos Modernos</i>	36
4. RESULTADOS	38
4. 1. ANÁLISIS POLÍNICO DEL NÚCLEO PI-7	38
4. 2. FORMACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN	42
4. 3. ZONACIÓN DEL DIAGRAMA DE POLEN	45
4. 4. RECAMBIO ECOLÓGICO	47
4. 5. COMPARACIÓN DEL NÚCLEO PI7 CON EL PRESENTE: TÉCNICA DE ANÁLOGOS MODERNOS	48
5. DISCUSIÓN	51
5. 1. EL ESTADIO ISOTÓPICO MARINO 7 EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN: EVIDENCIA PALINOLÓGICA	51
5. 2. GRUPOS Y CAMBIOS ECOLÓGICOS A TRAVÉS DEL TIEMPO	56
5. 3. ANÁLOGOS MODERNOS	61
6. CONCLUSIONES	63
7. REFERENCIAS	65
APÉNDICE 1	70

RESÚMEN

El presente estudio se basa en una secuencia sedimentaria de ~280 000 años antes del presente (280 ka A. P.), procedente del lago Petén-Itzá, Guatemala, y enfocado a entender la respuesta de las comunidades vegetales como resultado de los cambios climáticos regionales durante el Estadio Isotópico Marino 7 (aproximadamente entre ~190 y ~260 ka A. P.), así como la determinación de análogos modernos mediante la comparación con muestras modernas. De la secuencia sedimentaria (núcleo PI7) se tomaron 59 muestras para análisis polínico, comprendidas entre los metros 90.002 y 103.598, que de acuerdo al modelo cronológico corresponden a ~191.5 - ~220 ka A. P. Los datos de polen fósil fueron sometidos a un Análisis de Correspondencia sin Tendencia y juntamente con las muestras modernas (recolectadas del centro y sur de México) fueron sometidas a la Técnica de Análogos Modernos. Se identificaron tres momentos en la vegetación: PI7-I, caracterizado por elementos tropicales como son *Quercus*, *Myrica* y *Pinus*. PI7-II, estuvo representado por elementos de clima árido como son Poaceae y Amaranthaceae, y finalmente PI-III, caracterizado por *Celtis*, Melastomataceae, Bignoniaceae, y Moraceae, elementos de clima tropical y de mayor humedad que PI7-I. Las grandes cantidades de *Pinus* se han atribuido aquí a la gran producción de polen del mismo y a su capacidad de dispersión. Estos momentos en la vegetación parecen haber estado asociados a variaciones en la cantidad de humedad disponible, probablemente debidas a cambios en la localización de la Zona Intertropical de Convergencia. Así mismo, los cambios en la vegetación, al parecer, se dieron de forma abrupta. Las zonas de polen mostraron correspondencia con los subestadios isotópicos MIS 7.3, 7.2 y 7.1. Se identificaron también cuatro tipos de vegetación parecidos a: sabana (representada por Poaceae y Amaranthaceae), bosque tropical caducifolio (representada por *Protium*, *Caesalpinia*, *Hymenaea*, y *Mimosa*), bosque mesófilo de montaña (formación tropical constituida principalmente por *Alnus*, *Begonia*, Melastomataceae, *Quercus* y *Zanthoxylum*) y bosque húmedo tropical (asociación representada por Moraceae, Rubiaceae, Bignoniaceae y *Celtis*). La vegetación identificada en la sección analizada, comparada con la vegetación que ocupa hoy en día el centro y sur de México, mostró una concordancia tal, que todas las muestras fósiles de este trabajo tuvieron analogía con las comunidades vegetales modernas. Los resultados ilustran de manera sistemática una amplia variabilidad ambiental, y unas comunidades forestales altamente diversas y dinámicas.

1. INTRODUCCIÓN

El entendimiento de la dinámica de las comunidades biológicas constituye una herramienta valiosa para evaluar los cambios ambientales a través del tiempo, sin embargo, debido a que los ecosistemas del pasado no pueden ser observados directamente, los estudios paleoambientales ofrecen una oportunidad única de documentar las condiciones ambientales pasadas, las cuales no pueden ser registradas por mediciones instrumentales convencionales (Delcourt y Delcourt 1991). Existen diversas fuentes de datos paleoambientales que se derivan de núcleos de hielo, anillos de crecimiento de los árboles, espeleotemas, sedimentos marinos y continentales entre otros. Los registros sedimentarios marinos y continentales han sido ampliamente utilizados en reconstrucciones paleoclimáticas y paleoecológicas (Bradley 2015).

La Paleoecología recurre al análisis de indicadores ambientales de origen biológico, como por ejemplo diatomeas y polen, los cuales ofrecen información indirecta sobre las comunidades que les dieron origen (Delcourt y Delcourt 1991). El conocimiento y entendimiento de la dinámica de las comunidades que existieron en el pasado resulta de gran importancia. Es a través de esta que se pueden identificar eventos de cambio climático, ya que estas comunidades responden rápidamente a los cambios en el clima por medio de procesos de migración, colonización y extinción regional o global (Delcourt y Delcourt 1991).

Los registros paleoecológicos se extienden de años a millones de años, y por ello pueden ser utilizados para probar hipótesis ecológicas y biogeográficas bajo condiciones ambientales dinámicas y diferentes a las actuales (Birks y Birks 1980). Es por esto que es necesaria la obtención de registros sedimentarios con alcances temporales de escala milenaria para entender la dinámica climática global y la respuesta de los ecosistemas a los cambios ambientales. Así, este trabajo se basó en el estudio paleoecológico de una secuencia sedimentaria lacustre, debido a que éste tipo de secuencias representan los principales ambientes de sedimentación continentales conteniendo restos orgánicos como polen, diatomeas y cladóceros (Birks y Birks 1980).

Como parte del Programa Internacional de Perforación Continental (PIPC), en 2006 se llevó a cabo el Proyecto Científico de Perforación Petén-Itzá (PCPPI), del cual se obtuvieron siete secuencias sedimentarias, siendo el núcleo PI7 el abordado en este estudio. Con una profundidad de 133.2 m (la secuencia con mayor alcance estratigráfico) y una edad basal inferida de ~283 000 años antes del presente (283 ka A. P.), se analizó la sección comprendida entre los metros 90.002 y 103.598 correspondientes a ~191.5 - 220 ka A. P., de la cual se obtuvieron los datos correspondientes a la composición polínica, derivada de 59 muestras.

Los resultados de este trabajo representan una aportación a la escasa información acerca de la respuesta de las comunidades vegetales de Centroamérica a los cambios climáticos, así como una aproximación a dichos cambios climáticos

regionales durante el Estadio Isotópico Marino 7, que, debido a la falta de secuencias sedimentarias de amplio alcance temporal en latitudes medias y bajas, ha sido poco abordado.

2. MARCO TEÓRICO

2. 1. VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL CUATERNARIO

La teoría astronómica del cambio climático del Pleistoceno sostiene que las variaciones en los parámetros orbitales que rigen la dinámica terrestre han sido responsables de las dinámicas climáticas a nivel global, regional y/o local durante el Cuaternario (Milankovitch 1930, Imbrie e Imbrie 1980, Zachos et al. 2001). Estos parámetros son la oblicuidad (el grado de inclinación del eje), la precesión (se refiere al eje de rotación de la tierra describiendo una figura cónica) y la excentricidad, la cual se refiere a la forma de la órbita terrestre (Zachos et al. 2001). La excentricidad afecta el clima modulando la cantidad de insolación que llega a la Tierra. Por su parte, la oblicuidad actúa controlando la insolación que es irradiada en la superficie terrestre a través de cambios en el gradiente latitudinal. La precesión por su parte determina los ciclos de las estaciones, así como el contraste estacional en los hemisferios (Zachos et al. 2001).

La variabilidad climática del Pleistoceno ha quedado registrada en los núcleos de hielo, siendo hasta ahora los registros de EPICA Dome C y Vostok los más largos con 800 000 y 420 000 años antes del presente (800 y 420 ka A. P.), respectivamente. Los núcleos de hielo, proporcionan uno de los mejores registros de los cambios en los parámetros atmosféricos como los gases de efecto invernadero, y el $\delta^{18}\text{O}$ (EPICA Community Members 2004, Lang y Wolff 2011).

La composición isotópica de oxígeno permite identificar el hielo depositado en períodos glaciales o en periodos interglaciales. Durante los periodos glaciales las bajas temperaturas se extienden hacia el Ecuador y el vapor de agua que contiene el ^{16}O es transportado hacia los polos donde se condensa, precipita y queda atrapado en las capas de hielo, propiciando un empobrecimiento de ^{16}O en los océanos y un enriquecimiento de ^{18}O . Por su parte, durante los períodos interglaciales, las temperaturas se elevan y los polos se derriten mezclándose así el agua proveniente del deshielo con el agua de los océanos, provocando una concentración isotópica pobre en los casquetes polares y una concentración isotópica muy alta en océanos. Estos cambios han sido utilizados para crear una escala de medición estratigráfica conocida como los Estadios Isotópicos Marinos (MIS por sus siglas en Inglés) (Fig. 1) (Emiliani 1955, Shackleton 1967, Shackleton et al. 2003).

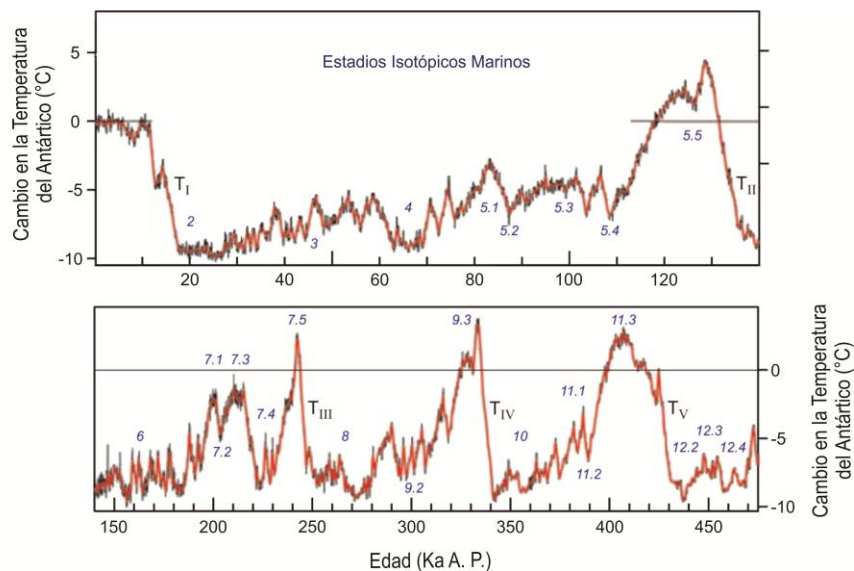


Figura 1. Estadios Isotópicos Marinos. En rojo se muestran los cambios en la temperatura del Antártico. La numeración en azul corresponde a los Estadios Isotópicos Marinos y en negro las Terminaciones de los interglaciales (T), modificado de Jouzelet al. (2007).

2. 1. 2. ESTADIO ISOTÓPICO MARINO 7

Los trabajos realizados sobre el MIS 7 son escasos, aún más para latitudes medias y bajas. Estudios como los realizados por Desprat, et al. (2006) en el margen noroccidental ibérico, Jouzel, et al. (2007) con el núcleo del Domo C de la Antártida, Hanselman, et al. (2011) en el Lago Titicaca, han revelado características interesantes sobre este estadio isotópico, como son duración, causalidad y variabilidad.

El MIS 7, del cual se deriva este estudio, es un período interglacial datado alrededor de los 225 ka A. P., y está dividido en cinco eventos isotópicos: 7.5, 7.4, 7.3, 7.2 y 7.1, los cuales representan los principales eventos de calentamiento, que a su vez se intercalan con cinco eventos fríos (Desprat et al. 2006, Jouzel et al. 2007, Lang y Wolff 2011). De estos picos de calentamiento, los eventos 7.5, 7.3 y 7.1 (Fig. 1) son los de mayor magnitud. Así mismo, se destaca que entre 7.5 y 7.3, existe un período con condiciones más parecidas a las glaciales. Es por esto que es considerado como un “interglacial débil” con mucha variabilidad (Lang y Wolff 2011).

Hacia el final del MIS 7 se encuentran tres episodios fríos y dos cálidos. Estos episodios marcan la Terminación III. Uno de estos eventos cálidos es de magnitud considerable y es seguido por un abrupto episodio frío. Al parecer todas las fases frías del MIS 7 parecen estar asociadas a descargas de hielo del Atlántico Norte (Desprat et al. 2006).

2. 2. FACTORES QUE DETERMINAN EL CLIMA DE CENTROAMÉRICA

Si bien los cambios en los parámetros orbitales han tenido un efecto importante sobre el cambio climático global, existen otros procesos y fenómenos alternos que pudieron intervenir en la respuesta climática regional, como son la Circulación Meridional de Retorno del Atlántico , la Zona Intertropical de Convergencia , el tamaño de la Alberca de Agua Cálida del Atlántico , y el Sistema de Oscilación del Sur-El Niño , entre otros (Correa-Metrio 2010). Es por esta razón que, aunque la teoría astronómica del cambio climático del Pleistoceno parece explicar las variaciones climáticas a escala global y regional, hay que tomar en cuenta las dinámicas terrestres internas que pueden intervenir en la respuesta climática (Karner y Muller 2000).

2. 2. 1. CIRCULACIÓN MERIDIONAL DE RETORNO DEL ATLÁNTICO

La Circulación Meridional de Retorno del Atlántico (CMRA) (Fig. 2) es un proceso detonante de cambios climáticos. La CMRA funciona como el principal transporte y almacenamiento de calor a través del océano; es debido a este transporte y almacenamiento de calor que la corriente influye directamente en el nivel del mar, la temperatura, los patrones de precipitación en tierra y los ciclos biogeoquímicos (Rintoul et al. 2010). Las variaciones en la fuerza de la corriente se traducen en el impacto en el clima regional y/o global. Así, el potencial de los mares tropicales para cambiar el balance oceánico de calor y agua dulce, y su rol como aporte de

vapor a la atmósfera los convierten en una pieza clave en los procesos climáticos (Correa-Metrio 2010).

La CMRA está compuesta por agua superficial, la cual fluye hacia el norte y transporta calor en esa dirección. Conforme atraviesa el Caribe y el Golfo de México, el agua se calienta y libera humedad que es transportada hacia Centroamérica. La evaporación incrementa la salinidad en la superficie del agua logrando que la temperatura del agua baje, este descenso en la temperatura permite que el agua sea suficientemente densa para alcanzar el fondo del mar hasta llegar a la costa de Groenlandia. De esta forma se genera una circulación rumbo al sur transportando agua fría profunda del Norte del Atlántico (Lynch-Stieglitz et al. 2007, Lopes dos Santos et al. 2010).

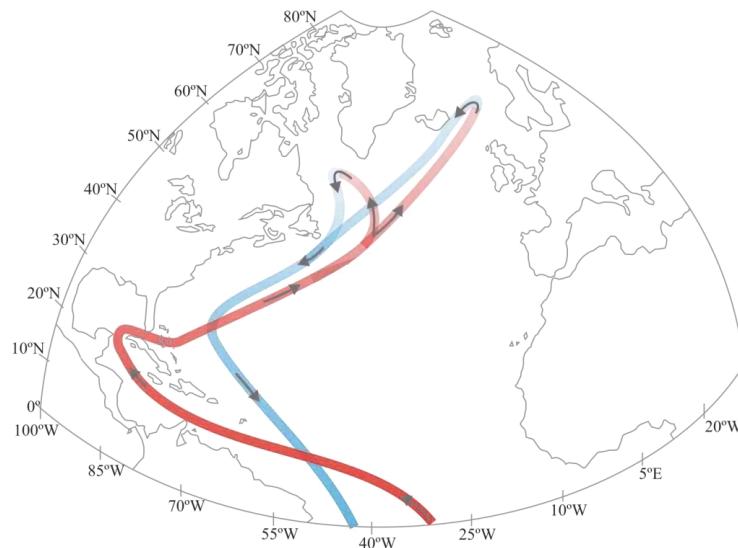


Figura 2. Circulación del Atlántico. En rojo se muestra la corriente cálida correspondiente a aguas superficiales. En azul se muestra la corriente fría que circula por las profundidades de regreso al sur, modificado de Correa-Metrio (2010).

2. 2. 2. ZONA INTERTROPICAL DE CONVERGENCIA

Al calentarse las masas de aire, éstas ascienden hasta la tropósfera superior y se desplazan en dirección a los polos. Al llegar al subtrópico, las masas de aire descienden fluyendo a latitudes bajas en la tropósfera inferior. A esta circulación cerrada se le conoce como celda de Hadley, y la Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) es su rama ascendente que se ubica en el ecuador térmico (Fig. 3) (Wang y Magnusdottir 2006).

Debido al movimiento de la tierra alrededor del sol, la ZITC no permanece en un lugar fijo todo el año. En el oeste del Pacífico, la ZITC se desplaza temporalmente en relación al movimiento de traslación, mientras que en el este del Pacífico tiende a permanecer en el hemisferio norte. De igual manera varía en forma. En el oeste del Pacífico es más amplia en términos de latitud, mientras que en el este del Pacífico es más estrecha y larga (Wang y Magnusdottir 2006).

Debido a los factores asociados con la ZITC, (humedad y temperatura), los cambios estacionales en la localización de la ZITC afectan drásticamente el patrón de lluvias, acentuando la sequía o la humedad en el Ecuador, así como las temporadas frías y cálidas en latitudes más altas. También existen cambios de mayor temporalidad que pueden provocar sequías o inundaciones severas (NASA 2000, Wang y Magnusdottir 2006).



Figura 3. Vista satelital de la Zona de Intertropical de Convergencia (NASA 2000).

2. 2. 3. ALBERCA DE AGUA CÁLIDA DEL ATLÁNTICO

La Alberca de Agua Cálida del Atlántico (AACA) es un gran cuerpo de agua (Fig. 4) que se forma durante el verano boreal (junio a septiembre) y es la principal fuente de calor para Centroamérica durante la temporada de lluvia. Este cuerpo de agua provoca que las masas de aire pasen sobre las montañas, generando así, un patrón de mayor humedad de este a oeste. Conforme las masas de aire avanzan hacia el Pacífico, éstas proveen el 50% de la precipitación del área. Dada su relación con la actividad de huracanes en el Atlántico (Wang y Lee 2007), los cambios en la AACA, como la estacionalidad, pueden haber jugado un papel muy importante en el clima del Cuaternario (Correa-Metrio 2010).

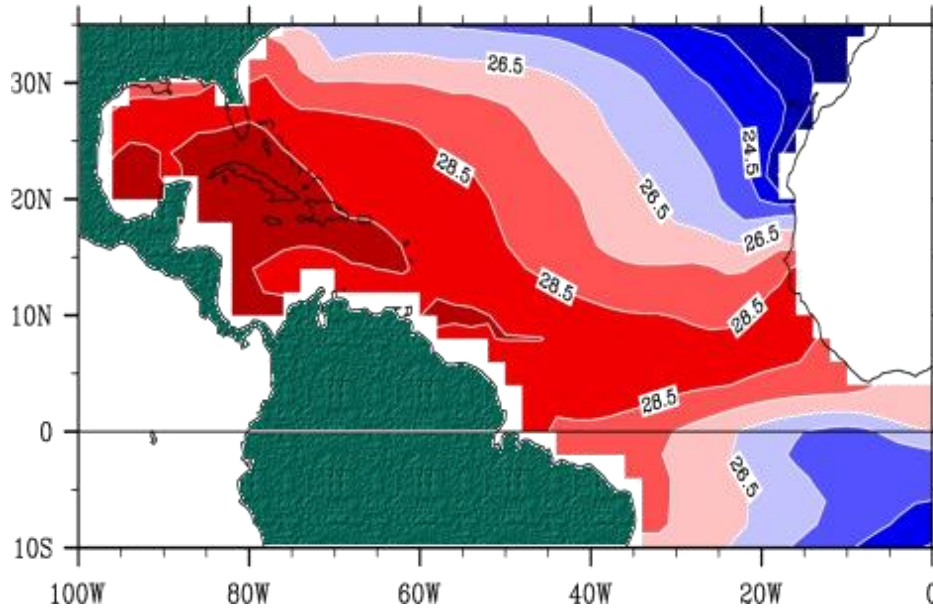


Figura 4. Alberca de Agua Cálida del Atlántico. Se muestra el tamaño que alcanza este cuerpo de agua y la temperatura superficial en los meses de junio a septiembre, modificado de Wang et al. (2011).

2. 2. 4. SISTEMA DE OSCILACIÓN DEL SUR-EL NIÑO

El Sistema de Oscilación del Sur-El Niño (SOSN) es un fenómeno que ha sido bien documentado. Además se sabe que el SOSN es capaz de modificar los patrones del clima en el mundo. Para Centroamérica, las fases cálidas y frías de este fenómeno modifican la posición de la Zona Intertropical de Convergencia, generando veranos más secos o más húmedos. En México, el SOSN modifica claramente los patrones de precipitación (Magaña et al. 2003). Estas anomalías, aunadas a los frentes fríos que transportan humedad durante las temporadas secas, determinan la variabilidad del régimen de humedad a escala interanual Correa-Metrio 2010.

Este sistema fue altamente variable en el pasado en términos de intensidad y frecuencia de fases cálidas y frías, es así que pudo afectar el clima del Cuaternario causando variaciones en los patrones estacionales en Centroamérica (Correa-Metrio 2010).

2. 3. LA PALINOLOGÍA COMO HERRAMIENTA DE RECONSTRUCCIÓN DE LA VEGETACIÓN DEL CUATERNARIO

El Cuaternario (Fig. 5) es un período caracterizado por etapas de enfriamiento y calentamiento intercaladas, denominadas glaciales e interglaciales respectivamente. Los glaciales e interglaciales no son estables, y por lo tanto existen también dentro de ellos otras etapas de enfriamiento y calentamiento menores denominadas estadales e interestadales. Sin embargo, los mecanismos que generan a dichas etapas aún no son claros. Hasta la fecha, lo único que se ha podido interpretar es cómo estas etapas afectan a los ecosistemas (Lang y Wolff 2011).

El estudio de los individuos, las poblaciones, y las comunidades de plantas y animales que vivieron en el pasado, así como sus interacciones con el ambiente, es abordado por la Paleoecología. La Paleoecología se apoya a su vez en la Palinología. La Palinología es la disciplina encargada de estudiar el polen, esporas, dinoflagelados y otros palinomorfos, tanto del pasado como del presente. Gracias a esta disciplina, es posible reconstruir los cambios en la estructura y composición de los ecosistemas a lo largo del tiempo (Delcourt y Delcourt 1991).

Eonotema / Eón		Eratema / Era		Sistema / Período		Edad (Ma)	
		Serie / Época		Piso / Edad		GSSP	
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno			actualidad	
			Pleistoceno	Superior		0.0117	
				Medio		0.126	
				Calabriense		0.781	
		Neógeno	Plioceno	Gelasiense		1.806	
				Piacenziense		2.588	
			Mioceno	Zancliense		3.600	
				Messiniense		5.333	
				Tortonense		7.246	
				Serravallense		11.62	
				Langhiense		13.82	
				Burdigaliense		15.97	
				Aquitaniense		20.44	
						23.03	
	Paleógeno	Oligoceno	Chattiense		28.1		
			Rupeliense		33.9		
		Eoceno	Priaboniense		38.0		
			Bartoniense		41.3		
			Luteciense		47.8		
			Ypresiense		56.0		
			Thanetiense		59.2		
		Paleoceno	Selandiense		61.6		
			Daniense		66.0		
			Maastrichtiense		72.1 ±0.2		
		Mesozoico	Cretácico	Superior	Campaniense		83.6 ±0.2
					Santoniense		86.3 ±0.5
					Coniaciense		89.8 ±0.3
Turoniense					93.9		
Cenomaniense					100.5		
Inferior	Albiense				~113.0		
	Aptiense				~125.0		
	Barremiense				~129.4		
	Hauteriviense				~132.9		
	Valanginiense				~139.8		
Berriasiense		~145.0					

Figura 5. Ubicación del periodo Cuaternario en la tabla Cronoestratigráfica, modificado de Cohen et al. (2013).

Una de las metas principales de la Paleoecología en el estudio de las comunidades vegetales en largas escalas de tiempo, es el uso del registro fósil de polen para entender la estructura de las comunidades (Delcourt y Delcourt 1991). En este sentido, el análisis polínico contribuye a interpretar la vegetación y el clima del pasado, y los ecosistemas terrestres que existieron en un determinado período de tiempo. Es por esto que el estudio de los registros sedimentarios del Cuaternario, desde el punto de vista palinológico, es fundamental para entender los efectos del cambio climático y los patrones de diversidad modernos (Delcourt y Delcourt 1991).

El polen fósil es uno de los indicadores más usados para el análisis paleoecológico, debido a que su pared de esporopolenina es altamente resistente, y por ende más abundante en los sedimentos terrestres (Birks y Birks 1980, Birks and Gordon 1985). El polen es producido en grandes cantidades, y sólo una pequeña fracción es usada en el proceso reproductivo (Birks y Birks 1980).

Parte del polen que no es utilizado en la reproducción es transportado y depositado en ambientes sedimentarios, como lagos y pantanos (Fig. 6). La sedimentación puede ser redistribuida tanto horizontal como verticalmente en un cuerpo de agua. El proceso de descomposición del polen es inhibido por condiciones reductoras, y se produce la preservación del mismo por miles de años. Mediante la identificación de los palinomorfos contenidos en las secuencias sedimentarias se puede reconstruir la comunidad vegetal circundante e inferir las condiciones ambientales (Birks y Birks 1980).

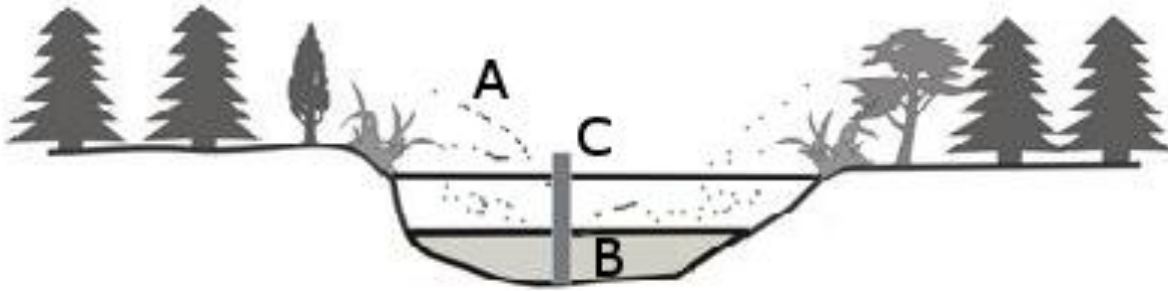


Figura 6. Esquema que ilustra la sedimentación del polen. A) Polen que no es usado en el proceso reproductivo y es transportado por acción del viento y del agua a ambientes sedimentarios, B) Sedimentos y C) Núcleo para la recuperación de sedimentos, modificado de Lozano-García (2004).

2. 4. ANTECEDENTES

Conociendo la ecología actual de las especies podemos hacer inferencias acerca del pasado ambiental mediante analogía con las condiciones ambientales actuales que rigen la composición de los ecosistemas (Simpson 2007). Sin embargo, no sólo es necesario establecer la analogía existente entre dos muestras, sino también el grado de analogía que estas presentan. Es por esto que, Overpeck, en 1985, utilizó ocho diferentes coeficientes de disimilitud para la comparación de muestras de polen fósil del Cuaternario Tardío y polen moderno, para así poder determinar la existencia o no existencia de análogos modernos. Encontró que para las muestras de antes de 9.3 ka A. P. no existieron análogos modernos, en contraparte, para las muestras del Holoceno si existieron (Overpeck et al. 1985).

En 2003, Gavin, presentó la curva ROC (Receiver Operating Characteristic), esta curva es una herramienta estadística que permite determinar análogos a partir de distancias métricas. Este método logró 1) evaluar diferentes distancias métricas para distinguir entre grupos (biomas), 2) identificar objetivamente umbrales óptimos para la determinación de análogos y 3) calcular un radio probable dentro del cual un grupo moderno es análogo de un grupo fósil (Gavin et al. 2003).

Con respecto a los registros sedimentarios en el estudio del registro de Tenaghi Philippon, Grecia, durante los últimos 450 ka, se encontró una buena correspondencia entre la extensión del volumen de hielo y el tamaño de la población de árboles, tanto en glaciales extremos, como en intervalos donde el

volumen alcanzó niveles intermedios. Durante los periodos interglaciales e interestadiales la extensión de los bosques parece estar asociada con los cambios en insolación a 65 °N. Por otro lado, a frecuencias suborbitales, la vegetación esteparia muestra varios picos que parecen estar asociados con eventos de desprendimiento de hielo del norte del Atlántico, sin embargo, la relación entre ambos registros no siempre fue proporcional (Tzedakis et al. 2003).

Para el registro de polen del lago Fúquene, Colombia, que abarca 284 ka A. P., éste reveló una clara relación entre la temperatura media anual y la variabilidad climática del norte del Atlántico, a escalas orbitales y milenarias. Los cambios a gran escala en la temperatura media anual, coincidieron con los cambios a 41 y 100 ka A. P., en el límite de hielo glacial. Así mismo se encontró, que los cambios en la vegetación a gran escala, no pueden ser explicados únicamente por variaciones en el volumen de hielo, pero los modelos y la reconstrucción de la temperatura media anual concuerdan bien cuando los gases de efecto invernadero son incluidos. En las mayores terminaciones glaciares y en el MIS 3, se encontraron rápidos (dentro de siglos) y extremos cambios en la temperatura (de 10 ± 2 °C). Los bosques tropicales de montaña y los páramos mostraron gran sensibilidad a estos cambios, lo que se vio reflejado en grandes migraciones altitudinales (Groot et al. 2011).

En 2011, se analizó un registro obtenido del Lago Titicaca, entre los territorios de Bolivia y Perú, que abarca cuatro períodos glaciales completos (370 ka A. P.). El análisis de polen, microfósiles acuáticos y material carbonizado, demostraron que

los períodos interglaciares fueron cálidos y secos, especialmente el MIS 7, que fue un prolongado interglacial. Mientras que los períodos glaciales fueron fríos y húmedos. Así mismo, la presencia de material carbonizado reveló el papel de los incendios en la conformación de los ecosistemas andinos (Hanselman et al. 2011).

2. 4. 1. LAGO PETÉN-ITZÁ. PROYECTO CIENTÍFICO DE PERFORACIÓN PETÉN-ITZÁ

Debido a que todos los lagos conocidos en Centroamérica se secaron durante los periodos glaciales, el registro sedimentario es incompleto. Así, los registros que abarcan más allá del último glacial son raros. Trabajos realizados en los lagos Salpeten, Macanche y Quexil, buscaron registros de la transición del Pleistoceno tardío al Holoceno temprano (Deevey et al. 1983).

El intento por encontrar lagos con una profundidad mayor a los 40 m, ha llevado a realizar estudios paleoambientales por casi 40 años en la región donde se ubica el Lago Petén-Itzá (Deevey et al. 1983, Anselmetti et al. 2006). Sin embargo, hasta antes de 2006, el registro más largo que se tenía era el del Lago Quexil, el cual abarcó los últimos 36 ka, y por lo tanto, todos los estudios estaban enfocados en el Holoceno y al impacto de la Civilización Maya sobre las tierras bajas tropicales (Leyden et al. 1993, Hodell et al. 2006).

Como resultado de la búsqueda de registros sedimentarios de mayor alcance temporal, en 1999, a través de la realización de un estudio batimétrico, se reveló la

profundidad máxima del Lago Petén-Itzá (165 m) y mediante un estudio de reflexión sísmica se calculó un paquete sedimentario menor a 40 m. Para 2002 un estudio complementario de reflexión sísmica, de baja resolución pero de mayor profundidad, reveló un paquete sedimentario de más de 100 m (Anselmetti et al. 2006, Hodell et al. 2006).

Una vez conocida la profundidad del lago y por tanto su capacidad para conservar un registro sedimentario amplio, en 2002, se recuperaron 12 núcleos de 10 sitios de perforación. Estos núcleos sirvieron para dar confiabilidad a los estudios sísmicos acerca del tipo, espesor y deposición de los sedimentos. Así mismo los sedimentos de las partes superiores (datados ~11.1 y 10.2 ka), revelaron información acerca del aumento en el nivel del lago como respuesta a los cambios climáticos (de árido a húmedo) durante la transición de la etapa final del Glacial al Holoceno temprano (Anselmetti et al. 2006).

En 2006, como parte del Programa Internacional de Perforación Continental, se llevó a cabo el Proyecto Científico de Perforación Petén-Itzá. La perforación del Lago se llevó a cabo de febrero a marzo. Se logró recuperar 1327 m de registro sedimentario distribuido en siete sitios de perforación (Fig. 11). Los resultados preliminares con respecto a litología de sedimentos, densidad, susceptibilidad magnética y registros gamma, mostraron un alto grado de variabilidad climática (Hodell et al. 2006).

El registro sedimentario del Lago Petén Itzá, fue analizado para determinar la composición de sedimentos, y por medio de métodos radiométricos se encontró que posee más de 200 ka (Mueller et al. 2010). De 200 a 85 ka A. P., el sedimento estuvo compuesto por arcillas de carbonato y limos, lo que indicó un régimen de sedimentación detrítico en un clima relativamente húmedo. A los 85 ka A. P., se encontró gravas, arena gruesa y gasterópodos terrestres, lo que indicó niveles bajos del lago, o una desecación de la cuenca debido a condiciones secas. De 85 a 48 ka A. P., arcillas de carbonato y arcillas de aguas profundas sugirieron un aumento en el nivel del lago. De 48 ka al presente se presentaron unidades intercaladas de arcilla y yeso, la deposición de yeso estuvo relacionada con un clima seco (Heinrich Events), mientras que las arcillas coinciden con interstadiales más húmedos (Mueller et al. 2010).

En 2012, mediante el estudio del núcleo PI-6 de este lago, se pudo reconstruir la vegetación de los últimos 86 ka. Se encontró que los cambios abruptos en la temperatura parecen haber influido en un rápido recambio ecológico, y por lo tanto en la ausencia de análogos modernos. El análisis de material carbonizado mostró que la frecuencia de incendios fue altamente variable, aparentemente debido a los cambios en la insolación entre verano e invierno (Correa-Metrio et al. 2012a).

2. 5. OBJETIVOS

1. Reconstruir la historia de la vegetación y el contexto climático en las tierras bajas de la Península de Yucatán durante el Estadio Isotópico Marino 7, a través del análisis palinológico sedimentario del núcleo PI7 del lago Petén-Itzá.
2. Establecer los cambios de la vegetación en la Península de Yucatán durante el Estadio Isotópico Marino 7 en el contexto de los procesos climáticos globales revelados por registros marinos y polares.
3. Determinar la existencia de análogos modernos, mediante la comparación de la vegetación actual con la obtenida del núcleo sedimentario PI-7 del Lago Petén-Itzá.

2. 6. HIPÓTESIS

La vegetación responde a cambios climáticos mediante procesos de adaptación, migración o extinción regional o global, sin embargo, estos procesos no han sido ampliamente estudiados para latitudes medias y bajas y menos aún para Centro y Sudamérica, debido a la falta de registros de amplio alcance temporal. Es por esto que la obtención del registro del Lago Petén-Itzá ofrece una oportunidad para estudiar estos procesos de las comunidades vegetales en Centroamérica.

Dado que la zona de Centroamérica está altamente influenciada por la Zona de Convergencia Intertropical debido a los factores asociados de temperatura y humedad y por ende precipitación, es de esperarse que cambios en la Zona de Convergencia Intertropical tengan un impacto en el clima regional y, por lo tanto, en la distribución de las comunidades vegetales de las tierras bajas de la Península de Yucatán durante el periodo interglacial MIS7. Así mismo, es de esperarse que estos cambios se vean reflejados en la distribución actual, encontrando comunidades análogas a las del pasado.

3. MÉTODOS

3. 1. ÁREA DE ESTUDIO

La Península de Yucatán (Fig. 7), con un territorio en forma trapezoidal el cual comparten México, Guatemala y Belice, se encuentra entre las coordenadas 21° 36´ norte, 19° 32´ sur (de latitud norte); 87° 32´ este, 90° 25´ oeste (de latitud oeste). En términos geológicos, es un sistema kárstico formado por rocas calizas y dolomías depositadas durante y después del Eoceno. Se caracteriza por poseer cuerpos de agua como depresiones, cavernas, lagos y cenotes, que constituyen una valiosa fuente de información paleoclimática (Curtis et al. 1996, Escolero et al. 2000).

Presenta características fisiográficas y climáticas muy variadas. Los climas dominantes en la Península son los de tipo A, cálidos y subhúmedos, que pueden incluir una temporada seca larga. La franja costera noreste está dominada por climas Aw (cálido subhúmedo), y en menor proporción, en la costa noroeste, por los climas BS (semiáridos, con dos subgrupos definidos de acuerdo al coeficiente de precipitación y temperatura, menor o mayor a 22.9 °C). En la región occidental predominan los climas Aw con menor proporción de lluvias y con presencia de sequía intraestival (de medio verano). En cuanto a la porción poniente existen dos subunidades de los climas Aw, más húmedos y menos cálidos respectivamente, con presencia de sequía intraestival. Únicamente la isla de Cozumel presenta

clima Am (cálido húmedo) con un aporte significativo de lluvias invernales (Koeppen 1948, Rzedowski 2006, Duno-de Stefano et al. 2012).

La vegetación predominante se constituye de bosques tropicales caducifolios (BTC), subcaducifolios (BTSC) y perennifolios (BTP), conformados por 2,300 especies distribuidas en 956 géneros (de los cuales uno sólo es estrictamente endémico: *Plagiolophus* Greenm. (Asteraceae), y 161 familias. A nivel de especie, se encuentran 203 taxones endémicos de la Provincia Biótica Península de Yucatán. Las familias más abundantes son las típicas de los ecosistemas terrestres tropicales de tierras bajas: Fabaceae (225 especies), Poaceae (214 especies), Asteraceae (142 especies), Orchidaceae (131 especies) y Euphorbiaceae (112 especies), seguidas por las familias Cyperaceae, Convolvulaceae, Malvaceae, Rubiaceae y Apocynaceae, entre otras (Rzedowski 2006, Fernández Carnevali et al. 2012).



Figura 7. Vista satelital de la Península de Yucatán. Así mismo, se muestra ampliado el lago Petén-Itzá.

El lago Petén-Itzá (16° 55' N y 89° 50' O, 110 msnm) es el de mayor relevancia en el Departamento del Petén el cual está conformado por los municipios Flores (cabecera departamental), San José, San Andrés, La Libertad, Melchor de Mencos, San Benito, Santa Ana, Dolores, Poptún, San Luis, Sayaxché y San Francisco (Figs. 8 y 9). Se ubica en la vertiente que drena hacia el Golfo de México, y colinda con la divisoria de aguas de la vertiente del Caribe (Salguero 2009).

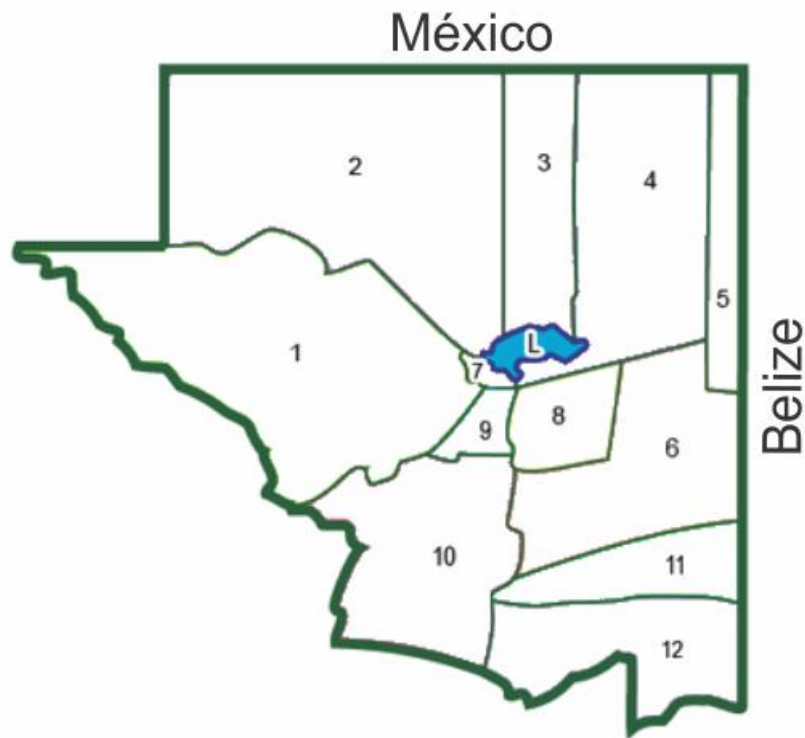


Figura 8. Ubicación del lago Petén Itzá (L) en el departamento del Petén. 1. La Libertad, 2. San Andrés, 3. San José, 4. Flores, 5. Melchor de Mencos, 6. Dolores, 7. San Benito, 8. Santa Ana, 9. San Francisco, 10. Sayaxché, 11. Poptún, 12. San Luis.

Este lago tiene una profundidad máxima de 165 m, representando el lago más profundo del Distrito del Petén. Esta profundidad permite la adecuada conservación del registro sedimentario, aún en tiempos de condiciones climáticas extremas (Hodell et al. 2006). El cuerpo de agua es alimentado directamente por la precipitación y por aguas subterráneas. En cuanto al régimen de precipitación, la estación húmeda ocurre entre mayo y octubre (INSIVUMEH 2010a).

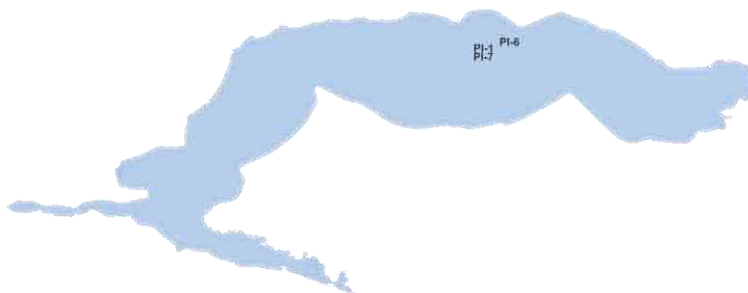


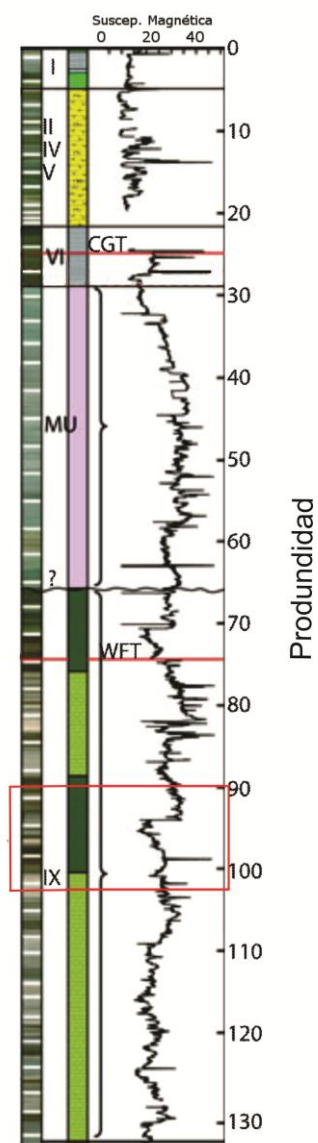
Figura 9. Lago Petén-Itzá y sitios de perforación: PI7, en el cual se enfoca este estudio, PI1 el segundo núcleo más largo y, PI6, usado como referencia para la cronología.

El régimen de lluvia es altamente estacional, y está relacionado con el desplazamiento temporal de la Zona Intertropical de Convergencia (Hodell et al. 2006, Hodell et al. 2008, Mueller et al. 2010). La precipitación anual entre los años 1990 y 2010 ha variado entre los 1,000 y 2,500 mm con un promedio de 1,746 mm. De igual manera, la temperatura anual ha variado entre los 25 y 27 °C, con un promedio de 26.5 °C (INSIVUMEH 2010a, b).

3. 2. PROYECTO CIENTÍFICO DE PERFORACIÓN PETÉN-ITZÁ

El Proyecto Científico de Perforación Petén-Itzá (PCPPI) forma parte del Programa Científico de Perforación Continental Internacional (PCPCI). El PCPCI tiene como objetivo principal la recuperación de secuencias sedimentarias continentales para el estudio de la variabilidad ambiental a escalas milenarias (Hodell et al. 2006, ICDP 2014). Con la perforación del Lago Petén-Itzá se buscaron tres objetivos fundamentales: 1) reconstruir la historia paleoclimática del norte de las tierras bajas neotropicales, enfatizando las relaciones entre los climas marinos y terrestres. Este objetivo sólo es alcanzable mediante la producción de series de tiempo con suficiente calidad y resolución temporal de manera que sean comparables con registros existentes que han marcado la pauta en la climatología global, 2) estudiar la Paleoecología y los patrones biogeográficos de los bosques tropicales de las tierras bajas en respuesta a perturbaciones causadas por fuego, cambio climático, impacto humano, entre otros, y 3) estudiar la biogeoquímica de los sedimentos, incluyendo estudios de microbiología, geoquímica intersticial, autogénesis y diagénesis mineral, entre otros (Hodell et al. 2006). En particular, esta tesis pretende reconstruir la historia de la vegetación y la historia paleoclimática durante el Estadio Isotópico 7 (MIS7), así como determinar la existencia de análogos modernos mediante el estudio del registro palinológico obtenido del núcleo PI7 (Fig. 10).

Figura 10. Columna estratigráfica del Núcleo PI-7. Encuadrado en rojo se muestra la sección analizada, modificado de Mueller et al. (2010).



3. 2. 1. PROTOCOLO Y MÉTODO DE MUESTREO

Los puntos de perforación para extracción de secuencias sedimentarias del lago Petén-Itzá se eligieron de acuerdo a dos perfiles sísmicos realizados en 1999 y 2002. El primero de alta resolución (que ofrece una menor profundidad pero una mayor integridad espacial de los sedimentos), mostró un paquete sedimentario de <40 m. El segundo de baja resolución que ofrece una mayor profundidad (Anselmetti et al. 2006). Dichos perfiles permiten conocer la estructura general de los sedimentos y seleccionar los lugares que garanticen un registro continuo que sea lo más prolongado posible en el tiempo. Las perforaciones se llevaron a cabo de febrero a marzo de 2006 usando un nucleador de pistón hidráulico sobre la Plataforma de Perforación GLAD 800. Se eligieron seis puntos de perforación, dos de aguas someras (PI-7 y PI-9), tres de profundidad media (PI-1, PI-2, y PI-6) y dos de aguas profundas (PI-3 y PI-4) con una recuperación de sedimento en promedio de 93.4%. Las características magnéticas de los sedimentos fueron evaluadas a una resolución milimétrica mediante un multisensor GEOTEK. (Hodell et al. 2006, Mueller et al. 2010). Dado que la susceptibilidad magnética fue evaluada en todos los núcleos, el uso de estos valores permitió una comparación detallada de núcleos paralelos para generar una secuencia maestra continua (Fig. 11) (Mueller et al. 2010).

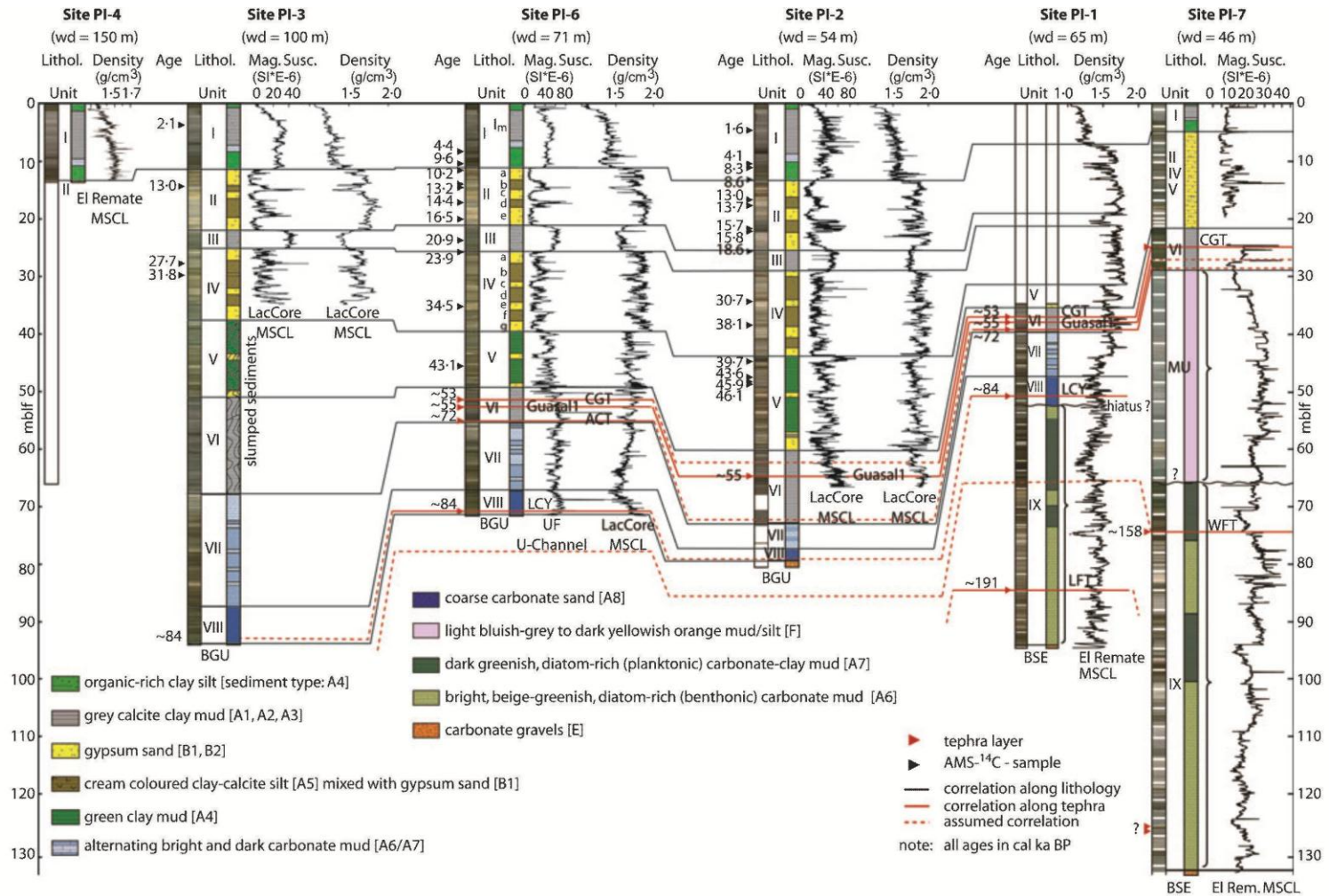


Figura 11. Compilación de los núcleos obtenidos del Lago Petén-Itzá. Se muestra la correlación de Susceptibilidad Magnética, Densidad, y tefras identificadas. Debajo de los núcleos se encuentra el código de colores de la composición de los sedimentos, (Mueller et al. 2010).

La cronología de los sedimentos del lago Petén-Itzá abarca más de 200 000 años antes del presente (200 ka A. P.) (Mueller et al. 2010). La cronología para los primeros 85 ka A. P., fue establecida mediante el análisis radiométrico de 35 muestras de materia orgánica terrestre derivadas de los sedimentos de los núcleos PI-2, PI-3 y PI-6. Las series de datos de susceptibilidad magnética fueron también usados para correlacionar los núcleos, los cuales en conjunto, elucidaron la estructura temporal de los últimos 43 ka en los sedimentos (alcance temporal del ^{14}C , (Bradley 1999)). Por encima del alcance del ^{14}C , se recurrió a la identificación de tefras, contando a 51.3 m con la Tefra Congo (CGT) con 53 ± 3 ka, datada mediante ^{14}C (Kutterolf et al. 2008), a 52.7 m la Tefra 1 (Guasal 1) con 55 ka, datada mediante correlación estratigráfica y a 70.9 m, la Tefra Los Chocoyos (LCY) con 84 ± 0.5 ka (Rose et al. 1999). Así, con una longitud de 75.9 m, el núcleo PI-6 es el mejor datado, y por lo tanto usado como modelo para la cronología de los núcleos PI-1 y PI-7. Sin embargo, estos últimos núcleos son más largos que PI-6 (94.5 y 133.2 m, respectivamente), lo que sugiere que podrían representar un registro sedimentario más antiguo.

En el núcleo PI-7, en el cual se enfoca esta tesis, también fue identificada la tefra CGT a una profundidad de 25 m. Adicionalmente, se encontró la tefra W-Tefra (WTF) a 74.3 m con una edad de 158 ± 3 ka. Desafortunadamente, no se encontraron otras cenizas, y la aplicación de técnicas radiométricas de U-Th fueron infructuosas en términos de refinar la cronología del mismo (Correa-Metrio, comunicación personal, 2015).

La profundidad de la tefra WTF, aunada a la diferencia en las profundidades alcanzadas por ambos núcleos, implica que los sedimentos basales del núcleo PI-7 abarcan más de 200 ka (Mueller et al. 2010, Correa-Metrio et al. 2012a). Para obtener la edad basal aproximada se hizo una extrapolación a partir de la tasa de sedimentación del segmento comprendido entre las dos tefras encontradas (~2,130 años por metro, bajo el supuesto de una tasa de sedimentación continua), es decir, si a una profundidad de 74.3 m (WTF) se obtuvieron ~158 ka, la edad basal del núcleo PI-7 (133.2 m) es de ~283 mil años (Fig. 12).

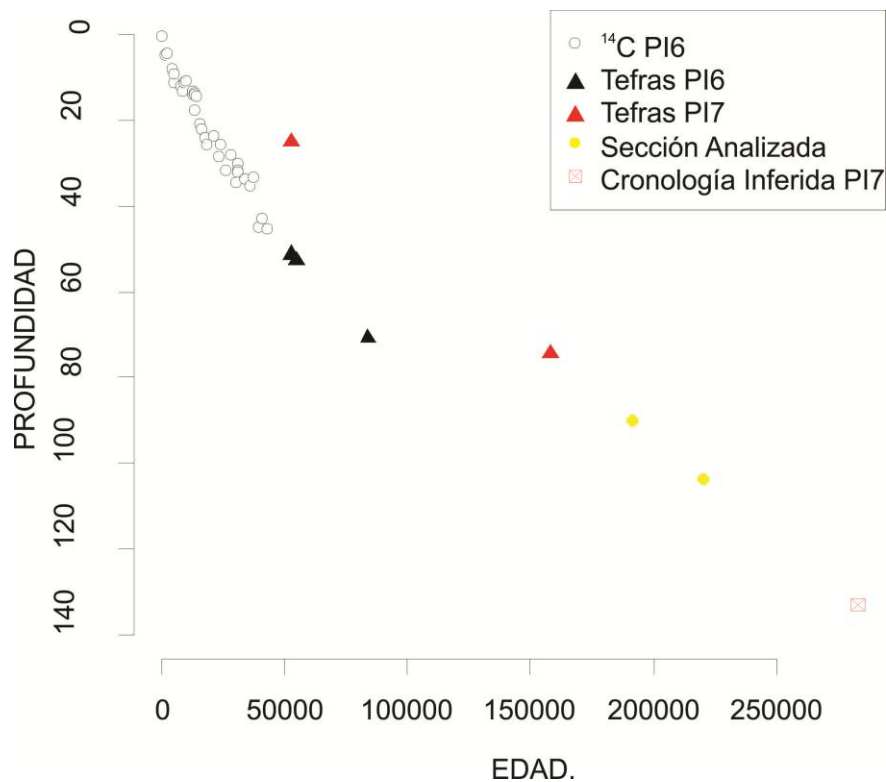


Figura 12. Cronología inferida para el núcleo PI7 a partir de la identificación de tefras y usando como referencia la cronología establecida para el núcleo PI6.

Con el fin de dar continuidad temporal al registro estratigráfico y cronológico obtenido del núcleo PI-6 (Correa-Metrio 2010), en esta tesis se analizaron las muestras obtenidas entre los metros 90.002 y 103.598 del núcleo PI-7. El análisis palinológico constó de 59 muestras. Se utilizó un volumen de muestra de 0.5 cm³ y se le añadió una tableta con 18 500 esporas de *Lycopodium clavatum* para el cálculo de la concentración de polen (granos por cm³) (Stockmarr 1972). Las muestras se prepararon de acuerdo a protocolos estándar con el fin de eliminar la materia orgánica y las arcillas (Faegri y Iversen 1989). Finalmente, las muestras fueron separadas gravimétricamente (Krukowski 1988) y conservadas en glicerina. El conteo de palinomorfos se realizó utilizando microscopio óptico a magnificaciones de 400x y 1000x, hasta alcanzar la suma de 200 granos de polen o 2000 esporas de *Lycopodium* (~10% de la muestra). Las esporas taxa de la familia Cyperaceae y taxa que representaran más del 40% de la muestra (Moraceae, *Quercus* y *Pinus*) fueron excluidas de la suma de polen pero no de la cuenta total (Correa-Metrio et al. 2011). Los datos fueron expresados como porcentajes de la suma de polen y en concentraciones (granos de polen por cm³).

3. 3. ANÁLISIS DE DATOS

3. 3. 1. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA SIN TENDENCIA

Una vez realizados los conteos de polen y obtenidos los porcentajes estos fueron graficados mediante el software C2 para poder visualizar el comportamiento de los taxa reportados. Posteriormente los datos fueron sometidos a un Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA). Esta técnica es una herramienta estadística de ordenación y reescalamiento espacial, la cual relaciona variables similares dentro de un conjunto de datos (Hill and Gauch 1980). Produce puntajes tanto para especies como para muestras. Dichos puntajes colocan a los datos dentro de un espacio dimensionalmente reducido, generalmente a dos ejes ortogonales. El significado ambiental de este espacio con respecto a los ejes ordenados depende del conocimiento actual que se tiene sobre el comportamiento de las especies, ya que el DCA es un análisis *a priori* que no utiliza información previa. Así mismo, los puntajes generados por el DCA de los ejes 1 y 2 pueden ser utilizados para generar una zonación estratigráfica, y poder así conocer el cambio de las variables ambientales a través del tiempo. El DCA coloca los datos dentro de una distribución normal, en la cual los datos son interpretados en términos de desviaciones estándar (DE). Valores cercanos a uno representan condiciones ecológicas similares, mientras que valores cercanos a cuatro representan un recambio ecológico completo (Correa-Metrio et al. 2014b).

3. 3. 2. TÉCNICA DE ANÁLISIS DE ANÁLOGOS MODERNOS

Para comparar las muestras fósiles con las muestras modernas (Correa-Metrio et al. 2013) se utilizó la Técnica de Análogos Modernos. Esta técnica consiste en el uso de distancias métricas. Para el presente estudio se utilizó la distancia de la cuerda al cuadrado, la cual calcula la distancia entre dos muestras de polen y la expresa como distancia euclidiana. Además, esta técnica trabaja con porcentajes, y le da mayor importancia a los taxa menos comunes (Overpeck et al. 1985).

Para utilizar esta técnica fue necesario determinar primero la distancia mínima ante la cual una muestra fósil presentaría una analogía con una muestra actual. Para ello fue necesario establecer una distancia de corte. Esta distancia se obtuvo mediante la mezcla de dos curvas normales (correspondientes al conjunto de datos de muestras modernas (Correa-Metrio et al. 2013) y el conjunto de datos de muestras fósiles respectivamente), cada una aportando su área bajo la curva (tanto su media como su porcentaje de error), generándose así un modelo de mezcla finita (Fig. 13), el cual, además de dar la distancia de corte para establecer el umbral debajo del cual las muestras fósiles pueden presentar una analogía moderna, redujo la posibilidad de encontrar falsos positivos o falsos negativos (Gavin et al. 2003).

Para cualquier umbral establecido, existe una fracción positiva y una fracción negativa. La fracción positiva (o falso positivo), corresponde a la probabilidad de que una distancia métrica (una muestra) esté por debajo del umbral establecido y

no sea un análogo moderno. La fracción negativa (o falso negativo) es la probabilidad de que una distancia métrica esté por encima del umbral establecido y si presente analogía con una muestra fósil (Fig. 13) (Gavin et al. 2003).

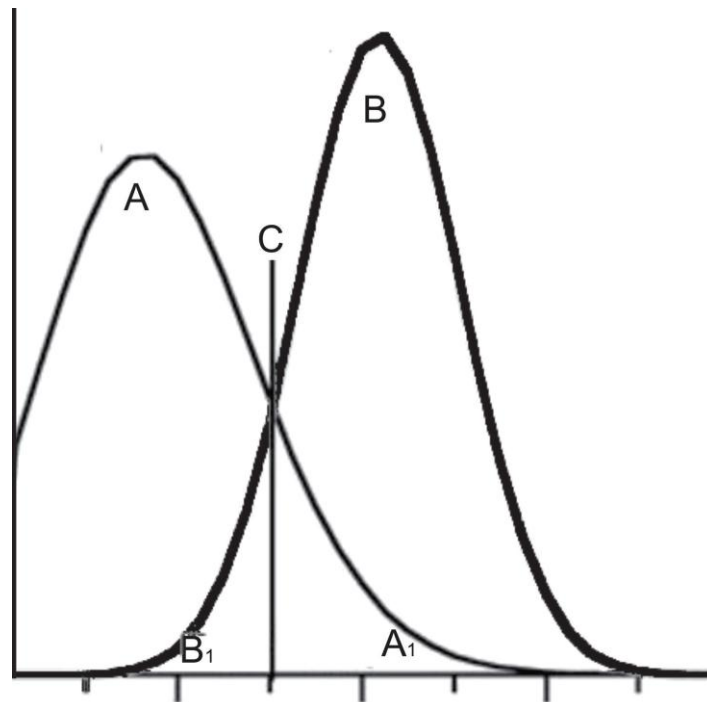


Figura 13. Ejemplo de Modelo de Mezcla Finita. A) fracción positiva, probabilidad de encontrar una analogía moderna, B) fracción negativa, probabilidad de no encontrar una analogía moderna. A₁) fracción correspondiente a la probabilidad de encontrar un falso positivo, B₁) Fracción correspondiente a la probabilidad de encontrar un falso negativo. C) Umbral establecido mediante la mezcla de ambas curvas normales modificado de (Gavin et al. 2003).

4. RESULTADOS

4. 1. ANÁLISIS POLÍNICO DEL NÚCLEO PI-7

En las 59 muestras analizadas se contaron en total 8929 granos de polen repartidos en 142 taxa, trece de los cuales no pudieron ser identificados. Moracea, *Quercus* y *Pinus* resultaron sobre-representados (>40%), por lo que fueron excluidos de la suma de polen pero no del conteo total. De igual manera, se excluyó a los taxa de la familia Cyperaceae por tratarse de taxa acuáticos. Se encontraron además un total de 905 esporas distribuidas en 17 morfotipos, los cuales no se pudieron determinar.

Los taxa dominantes fueron Arecaceae con 215 granos contados, Asteraceae tipo tubuliflora con 174, *Begonia* con 217, Bignoniaceae con 609, *Caesalpinia* con 164, Af. *Carya* con 287, *Celtis* presentó 1174, Melastomataceae con 969, *Myrica* con 308, Poaceae con 1361, *Psychotria* con 354, Rubiaceae con 414, *Sapium* con 248, así como los taxa sobre-representados. Los taxa menos representados cuentan con cantidades que van desde un solo grano encontrado en toda la sección analizada, como son Annonaceae, Bombacaceae, *Casearia*, *Faramea*, hasta cantidades de 37, 41, 43 y 45 granos contados correspondientes a Cucurbitaceae, *Bursera*, *Hymenaea* y *Spondias*, respectivamente (Tabla 1).

Tabla 1. Conteo de polen por taxa del núcleo PI-7.

Taxa	Granos contados				
<i>Acacia</i>	22	<i>Drymaria</i>	87	<i>Psychotria</i>	354
<i>Alchornea</i>	53	Ericaceae	5	<i>Pterocarpus</i>	10
<i>Alnus</i>	79	<i>Eugenia</i>	6	<i>Quercus</i>	5634
<i>Alternanthera</i>	20	Euphorbiaceae	73	Rubiaceae	414
Amaranthaceae	104	Fabaceae	109	Sabiceae	2
Amaryllidaceae	2	<i>Faramea</i>	1	Sapindaceae	8
<i>Ambrosia</i>	63	<i>Ficus</i>	5	<i>Sapium</i>	248
<i>Anacardium</i>	3	<i>Genipa</i>	19	Sapotaceae	56
Annonaceae	1	Gesneriaceae	1	<i>Serjania</i>	10
Apiaceae	8	Gramineae	13	<i>Solanum</i>	50
Apocynaceae	29	<i>Guettarda</i>	35	<i>Spondias</i>	45
Araliaceae	18	<i>Gustavia</i>	41	Sterculiaceae	1
Arecaceae	215	<i>Hedyosmum</i>	2	<i>Symphonia</i>	1
Asteraceae luguliflora	3	<i>Hyeronima</i>	2	<i>Theobroma</i>	1
Asteraceae tubuliflora	174	Hymenaea	43	<i>Toumefortia</i>	4
<i>Banisteria</i>	4	<i>Hyptis</i>	16	<i>Trema</i>	9
<i>Begonia</i>	217	<i>Ilex</i>	11	<i>Trichilia</i>	31
Bignoniaceae	609	<i>Inga</i>	25	<i>Trichospermum</i>	6
Bombacaceae	1	<i>Iresine</i>	11	Trigoniaceae	1
Boraginaceae	13	<i>Juglans</i>	3	<i>Typha</i>	3
<i>Borreria</i>	2	<i>Justicia</i>	6	<i>Ulmus</i>	7
Brassicaceae	9	<i>Lindernia</i>	4	<i>Vismia</i>	1
Bromeliaceae	3	<i>Liquidambar</i>	26	<i>Vitex</i>	11
<i>Brosimum</i>	17	Loranthaceae	2	<i>Vitis</i>	9
<i>Bursera</i>	41	<i>Loxopterigium</i>	27	<i>Zanthoxylum</i>	116
<i>Byrsonima</i>	21	<i>Ludwigia</i>	11		
<i>Caesalpinia</i>	164	<i>Machaerium</i>	115		
<i>Caryocar</i>	7	Malpighiaceae	134		
<i>Casearia</i>	1	Malvaceae	21		
<i>Cassia</i>	30	Melastomataceae	969		
Af. <i>Carya</i>	287	Meliaceae	10		
<i>Cecropia</i>	2	<i>Mimosa</i>	87		
<i>Celtis</i>	1174	<i>Moracea</i>	1953		
<i>Centropogon</i>	78	<i>Myrica</i>	308		
<i>Cerjania</i>	14	Myrtaceae	63		
<i>Connarus</i>	3	Nymphaea	27		
Convolvulaceae	132	Onagraceae	2		
<i>Cordia</i>	4	<i>Passiflora</i>	2		
<i>Croton</i>	25	<i>Paullinia</i>	23		
Cucurbitaceae	37	<i>Pinus</i>	4466		
Cyperaceae	3215	Poaceae	1361		
Dilleniaceae	3	<i>Polygala</i>	6		
		Portulacaceae	4		
		<i>Protium</i>	114		

Los taxa que con su alta o baja presencia fueron importantes para la identificación de condiciones particulares, fueron incluidos en el diagrama de polen (Fig. 14 a y b), en el Apéndice 1 se muestra el comportamiento de todos los taxa a través del perfil examinado.

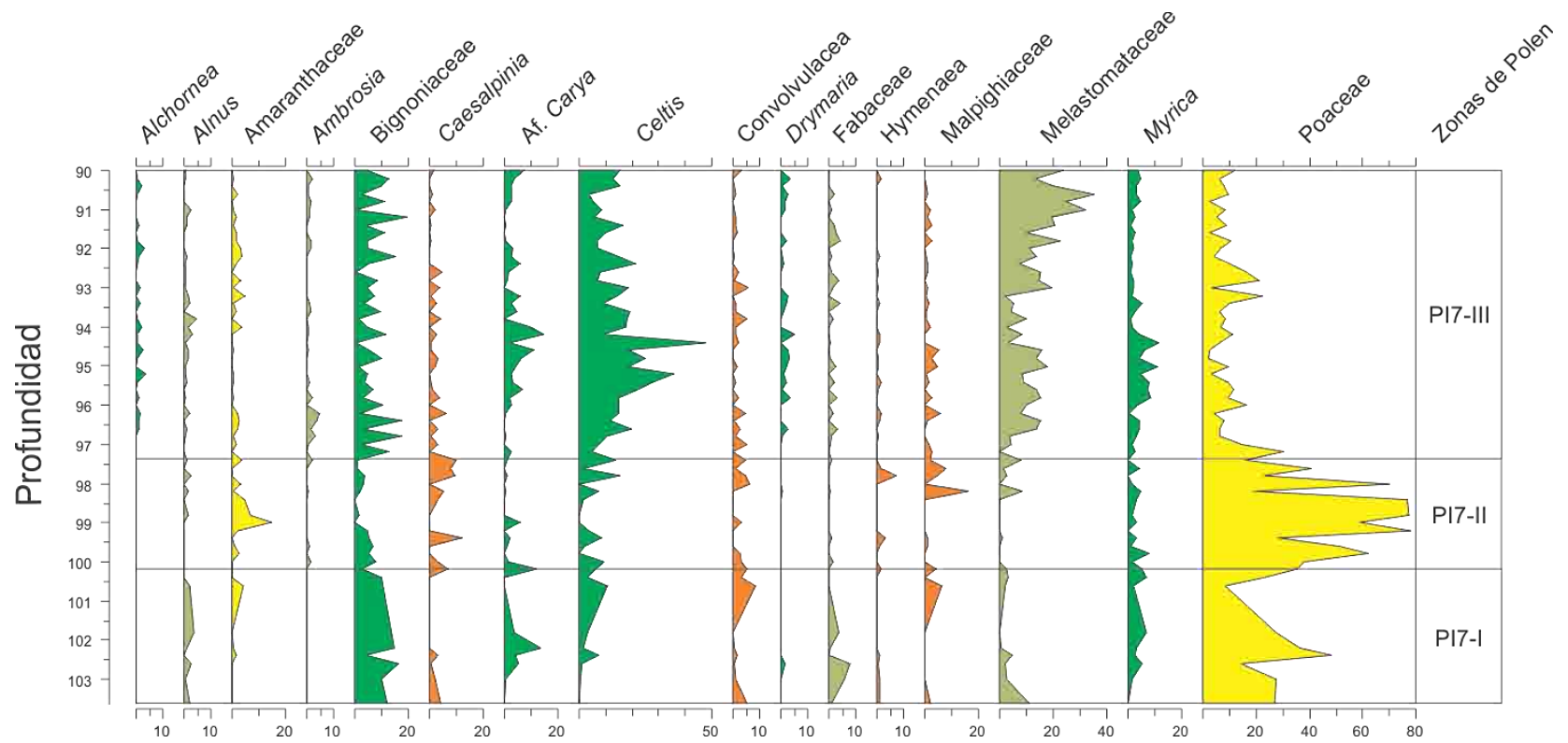


Figura 14a. Diagrama de polen de los taxa más representativos encontrados en el núcleo PI7, en los cuales se observan tres zonas de polen de acuerdo a la abundancia de los taxa.

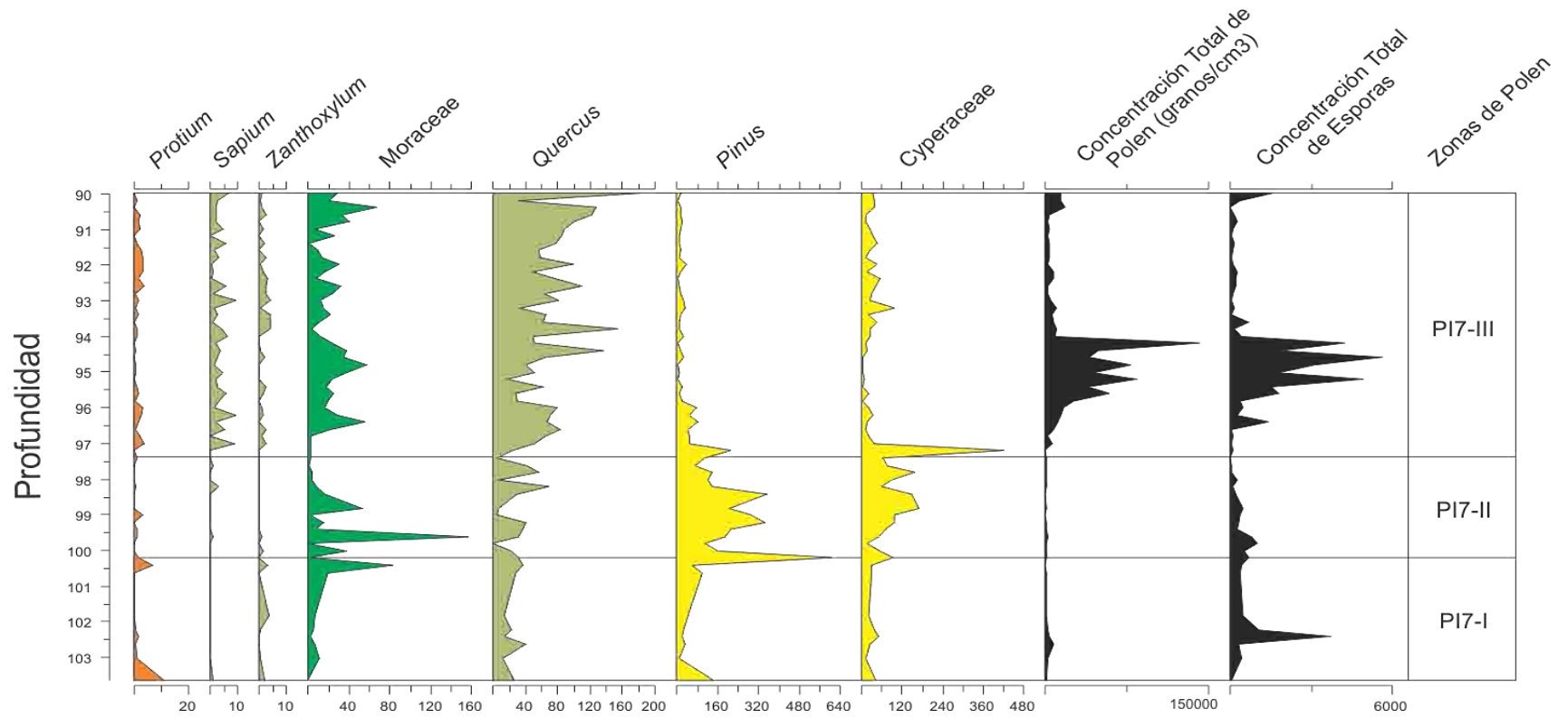


Figura 14b. Continuación. Diagrama de polen de los taxa más representativos encontrados en el núcleo PI7, en los cuales se observan tres zonas de polen de acuerdo a la abundancia de los taxa.

4. 2. FORMACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN

El análisis estadístico inició con un estudio exploratorio de los datos a través de una Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA, por sus siglas en inglés). Debido a que este análisis corrompe la varianza (Hill and Gauch 1980), los valores propios de los ejes (eigenvalues) son sólo medidas que indican su importancia relativa. El Eje 1 (DCA1), con un valor propio de 0.3875, tuvo mayor importancia que el Eje 2 (DCA2) con un valor de 0.11139. El Eje 1 es 6 veces más importante que el Eje 3 (DCA3) y siete veces más importante que el Eje 4 (DCA4). Así mismo, el Eje 2 es 1.7 veces más importante que el Eje 3, y 2 veces más importante que el Eje 4. Por estas razones los ejes 3 y 4 no fueron interpretados, debido a su bajo valor propio con respecto a los ejes 1 y 2 (Tabla 2). En relación a la longitud de los ejes, el rango del Eje 1 estuvo entre -1.5 y 2 desviaciones estándar (DE), mientras los puntajes en el Eje 2 variaron entre -1 a 2 DE (Fig. 15).

TABLA 2. Valores propios y longitudes para los cuatro primeros ejes del Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA).

	DCA1	DCA2	DCA3	DCA4
Eigenvalues	0.3875	0.11139	0.064	0.05523
Longitud de los ejes	1.957	1.35514	1.18828	0.99165

En el DCA, la ordenación de los taxa sugirió la formación de cuatro grupos ecológicos de acuerdo a la cercanía de los taxa en el plano y a lo largo de los ejes generados (Figura 15). En el cuadrante 1, se encontraron mejor representados

elementos como Moraceae, Rubiaceae, Bignoniaceae y *Celtis*. En el cuadrante 2 se encontró a la familia Poaceae. En el cuadrante 3 a *Pinus*, *Protium* y *Caesalpinia*, y en el cuadrante 4 la familia Melastomataceae y los géneros *Quercus* y *Zanthoxylum*. Elementos como Melastomataceae, *Quercus*, *Machaerium* y *Sapium* obtuvieron los puntajes más altos en el Eje 1, mientras que en el Eje 2 los puntajes más altos correspondieron a Moraceae, Arecaceae, Rubiaceae, Cucurbitaceae, Euphorbiaceae y Sapotaceae.

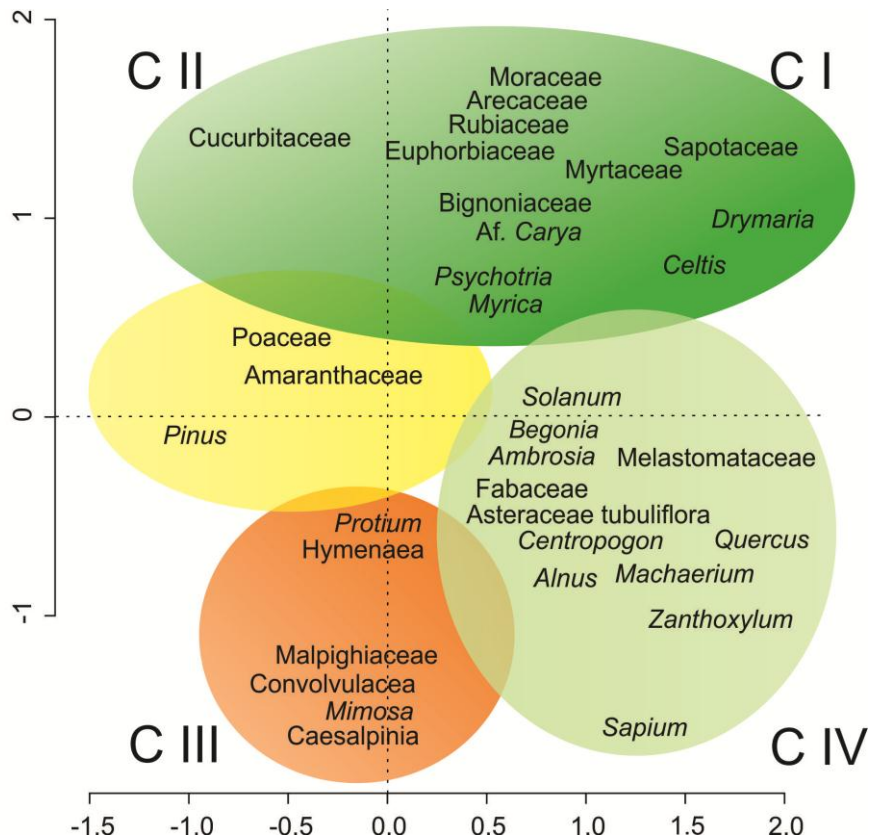


Figura 15. Ordenación de los taxa en el Análisis de Correspondencia sin Tendencia. Únicamente se muestran taxa cuyos porcentajes superaron el 1% por cada cm³. Cada área sombreada agrupa a los taxa que obtuvieron puntajes similares en el Eje 1 y 2.

La ordenación de las muestras (Fig. 16) se llevó a cabo mediante la agrupación de los puntajes similares de éstas, obteniéndose así tres zonas que corresponden con tres zonas de polen (PI7-I, PI7-II y PI7-III), las cuales se ilustran en el diagrama de polen (Figs. 14 a y b). De esta forma, la Zona PI7-I, mostró puntajes que abarcaron de -0.5 a 0, la zona PI7-II, presentó puntajes bajos, de -1 a -0.5 y finalmente la zona PI7-III con puntajes altos, desde 0 hasta 0.5. Así, las muestras que abarcan de 103.598 m hasta 100.401 m presentaron características similares. A partir del metro 100.2 se dio un cambio en las características de la sección analizada, las cuales predominaron hasta 97.2 m. Finalmente, a 97 m se dio otro cambio en las características de la sección y dominaron hasta el final de ésta en 90 m.

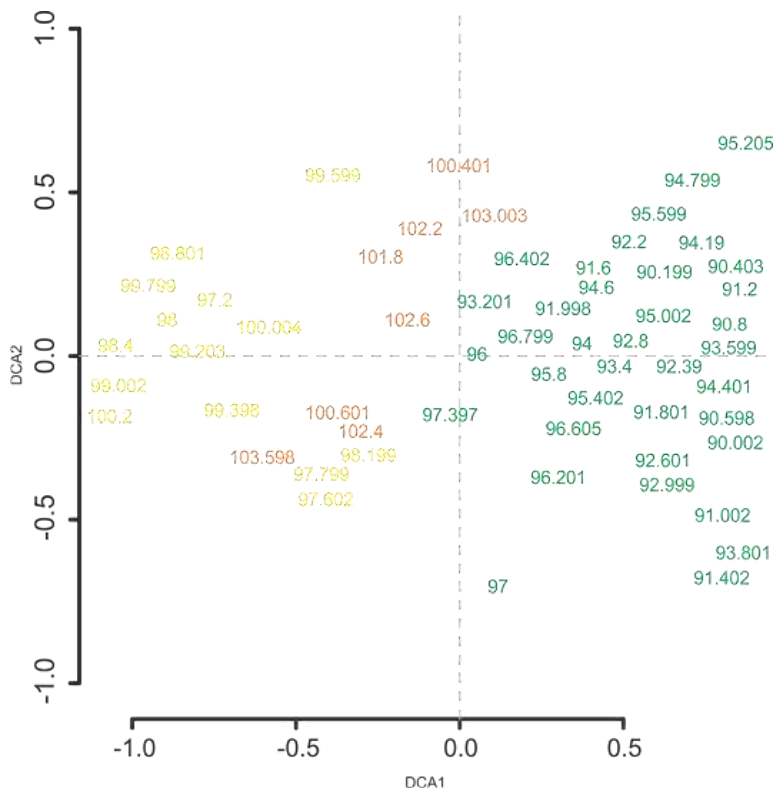


Figura 16. Ordenación de muestras en el Análisis de Correspondencia sin Tendencia. El código de colores corresponde a condiciones relativamente homogéneas y particulares de una zona de polen, deducidas a partir de los puntajes de las muestras.

4. 3. ZONACIÓN DEL DIAGRAMA DE POLEN

Los puntajes obtenidos en el Eje 1 del DCA, permitieron la identificación de tres zonas de polen denominadas PI7-I, PI7-II y PI7-III (Fig. 17). Dicha identificación se dio mediante cambios abruptos en los puntajes dentro de la sección analizada que acotaron secciones con puntajes relativamente homogéneos. De acuerdo a los puntajes del Eje 1, se pudo observar claramente que cada zona posee condiciones particulares relativamente uniformes, y se describen a continuación de acuerdo a los taxa que las caracterizaron (Figs. 14 a y b).

Zona PI7-I (103.598-100.2 m): En términos del DCA, ésta fue una zona con condiciones estables hasta llegar a 100.2. Los puntajes de esta zona se ubicaron entre 0.0 y -0.5. Estuvo caracterizada por *Pinus* y *Moraceae*, los cuales alcanzaron abundancias relativas máximas de 609 % y 83 %, respectivamente. Adicionalmente, *Poaceae* presentó porcentajes altos, con valores mínimo y máximo de 8.5 % y 48.36 %, respectivamente. *Quercus* con 36.6 %, *Rubiaceae* con 16.6 %, *Bignonaceae* con 14.7 %.

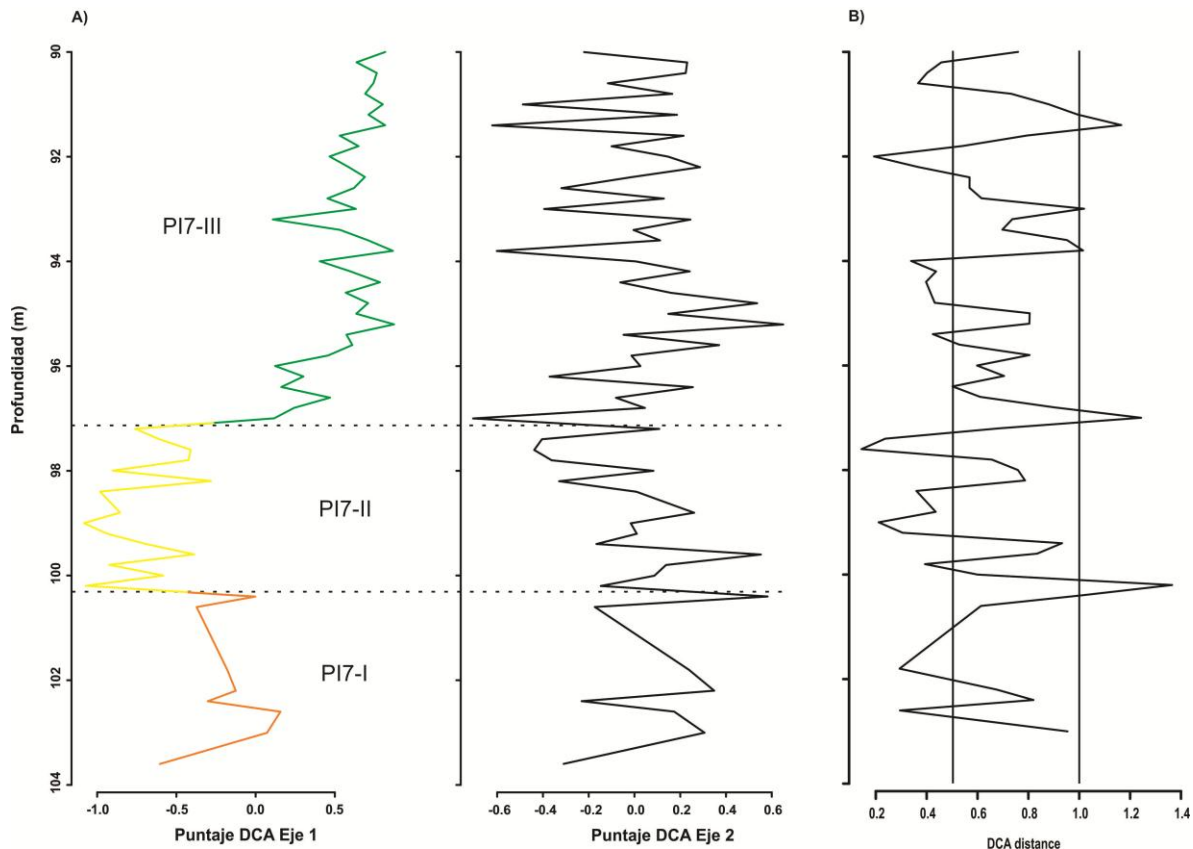


Figura 17. A) Diagrama de zonación. Se muestra en el Eje 1 los puntajes de las muestras, mientras que en el Eje 2 se muestran los puntajes de los taxa, B) se muestran los principales eventos de recambio ecológico expresados en desviaciones estándar.

Zona PI7-II (100.2-97 m): Esta zona se caracterizó por presentar los puntajes más bajos en el Eje 1 del DCA, los cuales oscilaron entre -0.5 y -1.0. Los porcentajes de *Pinus* y *Moraceae* bajaron drásticamente hasta valores de 60 % y 1.2 %, y mientras *Quercus* se mantuvo estable, familias como *Poaceae* y *Malpighiaceae* alcanzaron porcentajes de 77.9 % y 16.15 %, respectivamente. En general esta zona estuvo caracterizada por concentraciones de polen muy bajas.

Zona PI7-III (97-90.002 m): se caracterizó por una recuperación en los puntajes del Eje 1 del DCA, los cuales mostraron los valores más altos de toda la sección,

presentando un aumento progresivo desde -0.5 en el fondo de la zona, hasta más de 0.5 en su techo. En términos de la composición específica, destacó *Celtis*, con porcentajes que, aunque altamente variables, alcanzaron dos picos de abundancia máxima (35.6 % y 47.77 %). Melastomataceae presentó porcentajes bajos en la base de la zona, y un aumento gradual hasta alcanzar un máximo de 35.06 % hacia el techo de la misma. *Pinus* mantuvo porcentajes bajos que fluctuaron entre 83 % y 7 %. *Quercus* alcanzó un valor máximo de 181 %, y un mínimo de 67.5 %. Mientras que Bignoniaceae alcanzó un valor de 19.5 %, Poaceae decreció notablemente hasta un mínimo de 4.5 %. Es en esta zona donde se presenta la mayor concentración de polen y esporas de toda la secuencia.

4. 4. RECAMBIO ECOLÓGICO

Al graficar la distancia entre muestras contiguas contra la temporalidad del registro (Figura 17 b) se evidenciaron eventos de recambio ecológico. Entre los metros 103 y 102 encontramos dos eventos de recambio el primero con 1 Desviación Estándar (DE) y el segundo con 0.8 DE. Entre 100 y 98 m encontramos dos eventos parecidos a los anteriores uno con 1 DE y otro con 0.8 DE. Cabe destacar el metro 100 donde se localizó el evento más importante que alcanzó casi 1.4 DE. A 97 m hay un evento que sobrepasa las 1.2 DE, y entre 94 y 92 m ocurren dos eventos con 1 DE. Por último entre 90 y 92 m encontramos otro evento abrupto en este registro con 1.2 DE entre dos muestras contiguas.

4. 5. COMPARACIÓN DEL NÚCLEO PI7 CON EL PRESENTE: TÉCNICA DE ANÁLOGOS MODERNOS

El modelo de mezcla finita permitió la identificación de la distribución de las distancias entre muestras modernas análogas y muestras modernas no análogas, las cuales estuvieron centradas en 145 y 466, respectivamente (Tabla 3 y Fig. 18). Mientras la distribución de muestras análogas presentó una distribución leptocúrtica (58.5 Desviación Estándar (DE)) y contribuyó al 78.2% de la distribución compuesta, las muestras no análogas mostraron una distribución mesocúrtica (287.2 DE) y contribuyeron 21.8% a la distribución compuesta.

Tabla 3. Componentes de las distribuciones (muestras análogas y no análogas), mostrados en valores absolutos

Distribución	Media	Desviación Estándar	Lambda
Muestras análogas (parecidas)	145.8027	58.47234	0.7819546
Muestras no análogas (distintas)	466.8645	287.20391	0.2180454

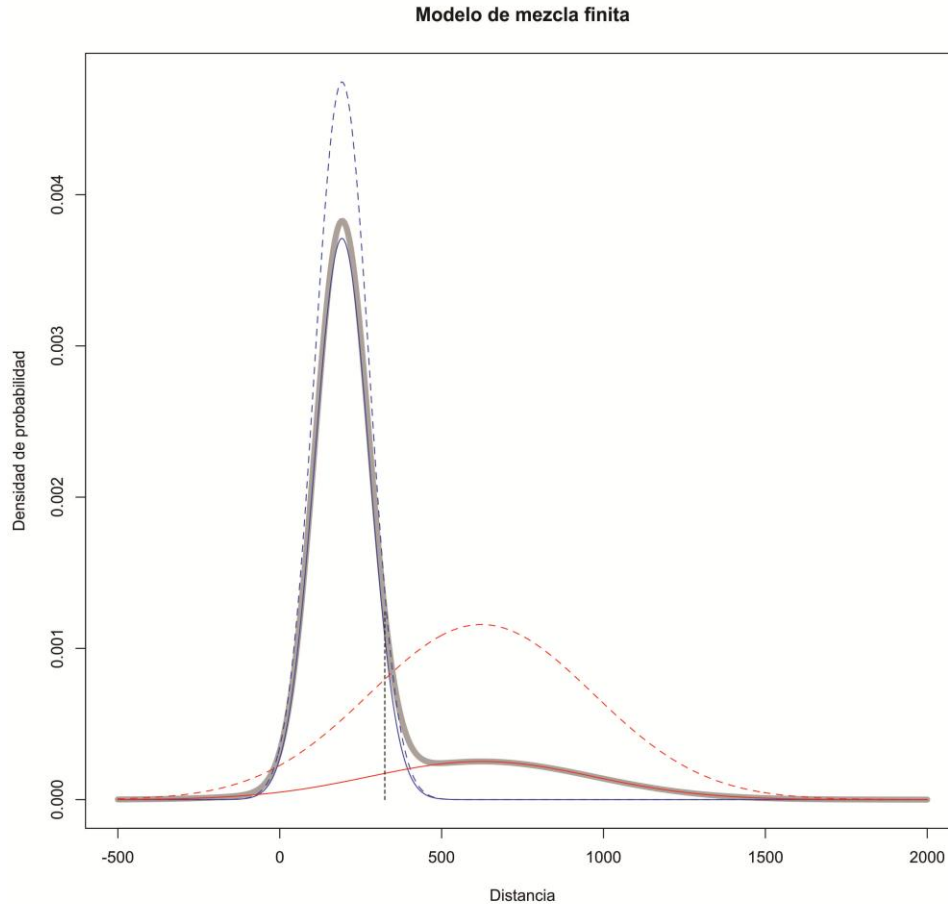


Figura 18. Modelo de Mezcla Finita. Curva azul punteada: representa la distribución de las muestras análogas (aporte absoluto); curva azul: representa el porcentaje que aporta a la distribución compuesta. Curva roja punteada: corresponde a la distribución de las muestras no análogas (aporte absoluto); curva roja: muestra el porcentaje aportado a la distribución compuesta. Curva gris: distribución compuesta. Línea negra: umbral establecido para la determinación de análogos modernos.

A partir de la distribución de las muestras análogas, se encontró el límite para el 95% de las observaciones, considerando la cola derecha como casos de no analogía. El umbral resultó entonces en 324.4 unidades de distancia. Al aplicar este umbral sobre las distancias entre muestras fósiles y modernas, se encontró que todas las comunidades representadas en el periodo bajo estudio, desde 190

hasta 220 ka A. P. (90-104 m de profundidad), encuentran algún análogo entre los datos modernos. Los análogos modernos estuvieron en los lagos Ocotailito (~90 m), San Pedro (~93 m), Nahá (~96 m), Montebello (~98 m), Parres (~99 m) y Crooked Tree (~102 m), cuyas distancias estuvieron cercanas al cero, mientras que el lago Petén Itzá (~100 m) presentó la distancia más alta, pero aún dentro del umbral (Figura 19).

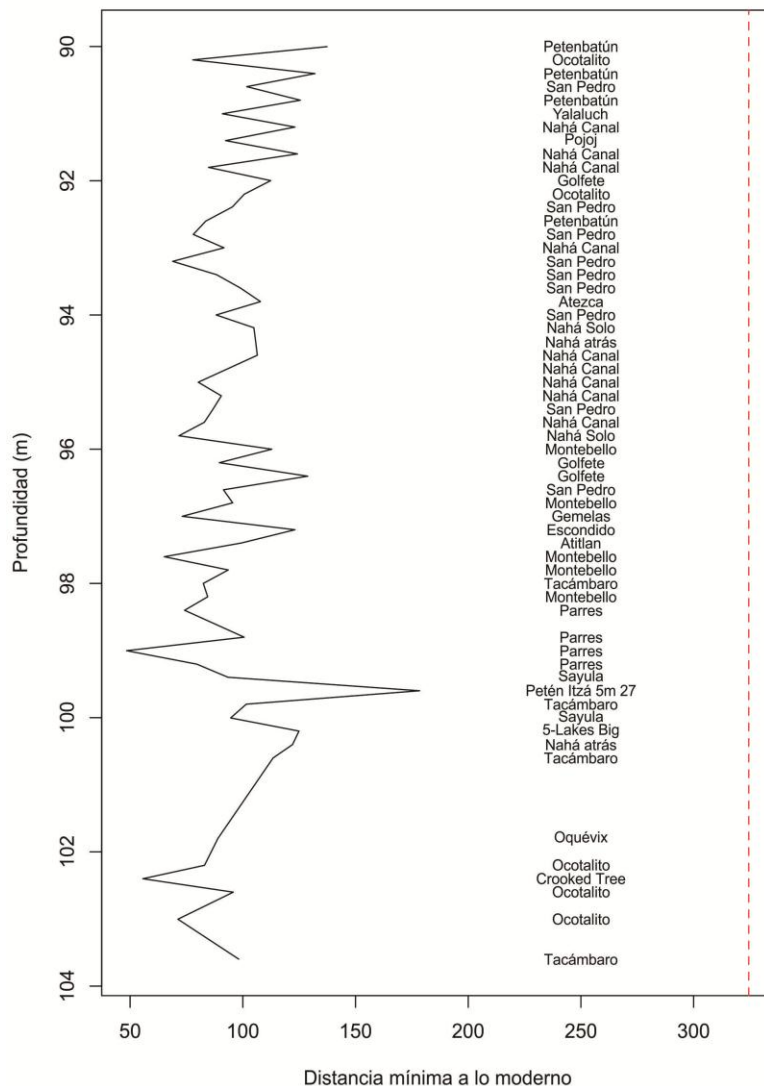


Figura 19. Análogos modernos (lagos) para las muestras fósiles. Las muestras con valores más bajos muestran un mayor grado de analogía. El umbral establecido para la determinación de análogos modernos se muestra con una línea roja punteada.

5. DISCUSIÓN

5. 1. EL ESTADIO ISOTÓPICO MARINO 7 EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN: EVIDENCIA PALINOLÓGICA

La principal variabilidad dentro de la secuencia analizada se encuentra resumida en las zonas de polen, las cuales representan tres momentos claramente identificables de la vegetación. A través de la zona PI7-I, es clara la dominancia de un espectro de polen dominado por elementos tropicales, con porcentajes importantes de taxa templados como *Quercus*, *Myrica* y *Pinus* (Figs. 14 a y b, 17a). Espectros de polen similares son comunes en muestras modernas derivadas del sur de la Península de Yucatán, asociados con bosques húmedos siempreverdes (Correa-Metrio et al. 2011). Los taxa templados en estas formaciones probablemente correspondan a poblaciones disyuntas de especies templadas que han encontrado en la amplia variedad topográfica y microclimática condiciones para su persistencia bajo condiciones regionales ecológicamente subóptimas (Rull 2009, Correa-Metrio et al. 2014c). De acuerdo a la estimación cronológica (Tabla 4), esta zona corresponde al periodo entre ~220 y 213 ka A. P., un periodo caracterizado por condiciones cálidas a nivel global (Estadio Isotópico Marino 7.3, Jouzel et al. 2007). Es probable que, bajo condiciones más cálidas, el ciclo hidrológico estuviese revitalizado y la ZITC tuviese una posición más al norte, de manera que la Península de Yucatán resultara beneficiada por una alta precipitación de verano (Hodell et al. 2008). De hecho, la conjunción de altos porcentajes de Poaceae y moderados de Moraceae a través de esta zona sugiere

temperaturas similares a aquellas que dominan la zona hoy (Correa-Metrio et al. 2012a), es decir de alrededor de 26 °C.

Tabla 4. Profundidad observada y edad estimada para las zonas de polen de este estudio.

Zona de polen	Profundidad techo (mblf)	Profundidad base (mblf)	Edad techo (años AP)	Edad base (años AP)
PI7-III	90.002	97.000	191442	206347
PI7-II	97.000	100.200	206347	213162
PI7-I	100.200	103.598	213162	220399

Si bien los espectros de polen sugieren un ambiente cálido y relativamente húmedo entre ~220 y 213 ka A. P. (zona PI7-I), los porcentajes de Moraceae fueron relativamente bajos (máximo 80%, pero en general por debajo de 30%) en comparación con espectros de polen reportados para el Holoceno en núcleos del mismo lago (Islebe et al. 1996, Correa-Metrio et al. 2012a). Los espectros de polen característicos de esta zona muestran algunas similitudes con espectros de polen del periodo entre 1 y 2 ka A. P. Sin embargo, estos últimos han sido asociados con el efecto de actividades antropogénicas extensivas sobre el paisaje (Leyden 2002), una interpretación que estaría fuera de lugar en el contexto temporal de la presente investigación. Así, es plausible que las condiciones climáticas que dominaron este periodo fueran similares a las que dominan el centro y sur de la Península en la actualidad, representadas principalmente por temperaturas cálidas y un régimen de precipitación relativamente estacional.

La dominancia de Poaceae y Amaranthaceae en la zona PI7-II (Figs. 14a y 17a), que de acuerdo a la estimación cronológica abarca el período entre ~213 y ~206

ka A. P. (Tabla 4), sugiere un clima muy seco (MIS 7.2 (Fig. 1) (Jouzel et al. 2007)). Aunque estas taxa son componentes comunes de todo tipo de sistemas (Rodgers and Horn 1996, Correa-Metrio et al. 2011, Correa-Metrio et al. 2013), su abundancia en porcentajes que representan aproximadamente el 80% del espectro de polen, cual es el caso de la zona PI7-II, sugieren un clima con déficit de humedad en el suelo durante la mayor parte del año (Bush 2002). Los altos porcentajes de *Pinus*, el cual alcanza hasta el 400% de la suma de polen en esta zona, probablemente no estuvieron asociados con dominancia del taxa parental, sino más bien con una sobrerrepresentación del mismo derivada de una alta producción de polen por parte de unos pocos individuos, y la baja productividad de otros taxa asociada a las condiciones climáticas extremas.

De acuerdo con estudios de distribución moderna de polen, estos altos porcentajes de *Pinus* en la zona PI7-II también podrían asociarse con condiciones de baja temperatura (Correa-Metrio et al. 2011, Correa-Metrio et al. 2013). Sin embargo, la presencia de porcentajes importantes de *Caesalpinia*, *Protium*, y especialmente Moraceae, sugieren la dominancia de condiciones cálidas (Domínguez-Vásquez et al. 2004, Correa-Metrio et al. 2011). De acuerdo a la distribución moderna de *Pinus* y Moraceae, la temperatura media anual a través de esta zona pudo estar entre 20 y 22 °C (Correa-Metrio et al. 2011), límites definidos por los porcentajes de estos dos taxa en su orden respectivo.

Finalmente, la dominancia de Cyperaceae con porcentajes por encima de 100% respalda la interpretación de condiciones secas, ya que altas abundancias probablemente estuvieron asociadas con niveles bajos del lago, a su vez

relacionados con proximidad de las aguas someras de la orilla donde se desarrolla la población más importante de los taxa de esta familia (Bush 2002, Correa-Metrio et al. 2010). Niveles bajos del lago con porcentajes similares de Cyperaceae se presentaron en el mismo lago durante los estadales de Heinrich, mismos que han sido asociados con condiciones extremadamente secas a nivel regional (Correa-Metrio et al. 2012b).

Finalmente los ensambles palinológicos de la parte superior del registro analizado, la zona PI7-III con una estimación temporal de entre ~206 y ~191 ka A. P. (Tabla 4), sugiere el establecimiento de condiciones húmedas con un clima cálido, pero más fresco que aquel que caracterizó la parte basal del registro (zona PI7-I). Las condiciones húmedas se evidencian en la presencia y alta abundancia de taxa como *Celtis*, Melastomataceae, Bignoniaceae, y Moraceae (Figs. 14 a y b, Fig. 17a), en conjunto característicos de condiciones relativamente cálidas y poco estacionales en términos de la precipitación (Bush 2000, Correa-Metrio et al. 2011). Esta zona de polen probablemente estuvo asociada en términos de procesos globales al MIS 7.1, un periodo cuya temperatura a nivel global estuvo aproximadamente 1 °C por encima que aquella registrada para el MIS 7.3 (Jouzel et al. 2007).

Dos rasgos interesantes de esta zona de polen son la forma de campana que presentan *Celtis* y *Myrica*, los cuales alcanzan sus máximos porcentajes hacia el centro de la zona, y el aumento progresivo de la abundancia de *Quercus* y Melastomataceae. Mientras el primero puede estar indicando un clima relativamente cálido y húmedo (Bush 2000, Correa-Metrio et al. 2011), la

tendencia en los segundos estuvo probablemente asociada a una tendencia hacia condiciones más frías (Correa-Metrio et al. 2013), y por ende el fin del periodo interglacial MIS 6. De hecho, en la zona bajo estudio, la distribución de polen de *Quercus* alcanza su abundancia máxima alrededor de los 19 °C (Correa-Metrio et al. 2011), por lo que se asume que dados porcentajes de este taxa (superiores al 100%), indican la temperatura al momento de depositación del techo del registro, (alrededor del valor mencionado).

En términos generales, la interpretación *a priori* de la secuencia polínica sugiere que durante el periodo estudiado, se presentó una alta temperatura. El patrón aparente va de temperaturas alrededor de 26 °C entre ~220 y ~213 ka A. P., a temperaturas entre 20 y 24 °C para el periodo de ~213 a ~206 ka A. P., y finalmente una disminución progresiva entre ~206 ka A. P. y el techo del registro en ~190 ka A. P., para finalizar este último punto en el tiempo con temperaturas de alrededor de 19 °C. En términos de la humedad, es aparente un patrón de un periodo de sequía extrema entre ~213 y ~206 ka (zona PI7-II), encapsulado entre dos periodos húmedos representados por las zonas PI7-I y PI7-III. La diferencia entre estas dos últimas zonas de polen la marca una mayor disponibilidad de humedad en la última, posiblemente derivada de menos evaporación como consecuencia de una menor temperatura, aunque no se descarta que se hayan presentado mayores niveles de precipitación anual.

El patrón de cambios en la vegetación encontrado para el MIS 7 en esta investigación coincide con aquel reportado para los interglaciales MIS 5, MIS 7 y MIS 9 en el Lago Titicaca, consistentes en periodos cálidos y húmedos con una

intermisión cálida y seca en medio (Hanselman et al. 2011). Es posible que este patrón en la Península de Yucatán resultara de un desplazamiento al norte de la ZITC durante la inyección y etapa temprana de los interglaciales, el cual traería abundantes lluvias de verano (Peterson et al. 2000, Peterson y Haug 2006, Hodell et al. 2008). No obstante las temperaturas altas a nivel global fueron características de los interglaciales (EPICA Community Members 2006), pequeñas variaciones en ellas, tal como aquella que caracterizó la fluctuación MIS 7.2 (Jouzel et al. 2007), pudieron haber derivado en cambios de los regímenes estacionales, lo cual podría explicar las intermisiones de sequía extrema. Una explicación alternativa es la presencia de puntos de inflexión (*tipping points*) en el sistema climático de la Península, derivados de una respuesta abrupta a un forzamiento externo gradual (Lenton et al. 2008, Bush et al. 2010, Williams et al. 2011). No obstante, esta última idea necesita investigaciones subsecuentes para su elaboración conceptual y práctica.

5. 2. GRUPOS Y CAMBIOS ECOLÓGICOS A TRAVÉS DEL TIEMPO

La ordenación producida por el DCA, generó una agrupación bastante clara de los taxa en términos de afinidades comunitarias y funcionales modernas (Fig. 15), como se elabora a continuación. El Eje 1 de la ordenación marcó claramente un gradiente de humedad, con taxa asociados a condiciones secas (Marchant et al. 2002) tales como Poaceae, Amaranthaceae, Malpighiaceae, *Mimosa*, *Caesalpinia*, entre otros, ordenados en el lado negativo del mismo, en los cuadrantes CII y CIII (Fig. 15). De manera contrastante, taxa cuya distribución moderna está asociada a

condiciones húmedas (Marchant et al. 2002, Rzedowski 2006), tales como Moraceae, Melastomataceae, *Quercus*, *Celtis*, *Begonia*, *Sapium*, *Machaerium*, entre otros, se ordenaron en los cuadrantes CI y CIV. Así, mientras puntajes negativos en este eje estuvieron asociados con condiciones secas, puntajes positivos representaron condiciones de alta disponibilidad de humedad.

Dado que el Eje 1 del DCA representa el gradiente ambiental más importante reflejado en las secuencias bajo estudio (e.g. Hill and Gauch 1980, Bush and Colinvaux 1990, Correa-Metrio et al. 2014a), es razonable concluir que la variabilidad más importante del periodo bajo estudio estuvo asociado con cambios en la disponibilidad de humedad. De hecho, cuando los puntajes del Eje 1 se representan en profundidad (Fig. 16), la señal representada fue consistente con los cambios en disponibilidad de humedad inferidos a partir de la interpretación del diagrama de polen (Figs. 14 a y b). Las condiciones de máxima sequía se presentaron en la zona PI7-II, mientras los niveles máximos de disponibilidad de humedad correspondieron a la zona PI7-III, y los niveles intermedios estuvieron representados en la zona PI7-I (Fig. 17a). Sin embargo, es importante notar que la tendencia hacia condiciones más húmedas desde la base hacia el techo de la zona PI-III probablemente no estuvieron asociadas a mayor precipitación sino más bien a menor evapotranspiración potencial dada una menor temperatura. Un patrón similar ha sido evidenciado para la misma región durante el Último Máximo Glacial, aunque bajo temperaturas mucho más bajas en este último caso (Bush et al. 2009, Correa-Metrio et al. 2012a).

El Eje 2 resultó menos evidente en términos de la ordenación de los taxa (Fig. 15). Sin embargo, los puntajes de los taxa en este eje, en conjunción con aquellos del Eje 1, permitieron la identificación de cuatro grupos ecológicos, ofreciendo evidencia adicional sobre la consistencia de la señal ecológica y climática de la base de datos generada, y por ende sobre las interpretaciones planteadas. Los grupos identificados fueron sabana, bosque tropical caducifolio, bosque mesófilo de montaña y bosque húmedo tropical (Fig. 15). Las sabanas estuvieron representadas principalmente por Poaceae, que es un elemento que caracteriza los hábitats neotropicales que van desde los bosques de bambú hasta las sabanas y pantanos (Bush 2002), y Amaranthaceae, que pueden encontrarse desde zonas áridas hasta zonas semiacuáticas (Sánchez-del Pino et al. 1999). *Pinus* también resultó representado en esta agrupación, y probablemente su presencia corresponde a dos factores: i) su amplio rango de tolerancia y capacidad para habitar climas semiáridos (Meave y Kellman 1994, Rzedowski 2006); y ii) su alta representación en el espectro palinológico dada su alta producción de polen, mismas que desborda la señal de otros taxa (Lozano-García y Xelhuantzi-López 1997, Correa-Metrio et al. 2012c). La otra formación forestal asociada a climas secos identificada fue el bosque tropical caducifolio, en el cual destacaron *Protium*, *Caesalpinia*, *Hymenaea*, y *Mimosa*, taxa característicos de este tipo de asociaciones en la Península de Yucatán (Rzedowski 2006, Correa-Metrio et al. 2011).

En términos de las formaciones tropicales asociadas a climas húmedos, resultaron representados el bosque mesófilo de montaña, que ocupa sitios más húmedos y

cálidos que aquellos dominados por bosques de Pino-Encino, y está compuesto en su mayoría por árboles (Rzedowski 2006). En este caso, esta formación resultó representada principalmente por *Alnus*, *Begonia*, Melastomataceae, *Quercus*, *Zanthoxylum*, aunque también se presentaron plantas herbáceas como *Ambrosia* y Asteraceae. Finalmente, se identificó el bosque húmedo tropical, que es una de las asociaciones vegetales más complejas y que abarca la mayor parte del sur de la Península de Yucatán (Rzedowski 2006). Esta asociación resultó representada principalmente por Moraceae, Rubiaceae, Bignoniaceae y *Celtis*, taxa polínicos representativos de climas húmedos y cálidos (Bush 1991, 2000, Correa-Metrio et al. 2011).

Como se mencionó anteriormente, los puntajes en el Eje 2 no resultaron directamente interpretables, pero contribuyeron a dilucidar los patrones de vegetación revelados por los espectros de polen fósil. Una de las razones que pudieron haber dificultado la interpretación directa del Eje 2 es la variabilidad intrínseca del sistema físico-biótico a través del periodo analizado. Factores intrínsecos (principalmente dinámicas de poblaciones y el azar) y extrínsecos (cambios climáticos) al sistema ecológico probablemente estuvieron asociados a excursiones en la respuesta del sistema biológico con respecto a la tendencia de largo plazo (Williams et al. 2011 presentan una conceptualización de factores intrínsecos y extrínsecos), esta última observable en los puntajes del Eje 1 (Fig. 16). Estas excursiones probablemente son la explicación más probable a la alta variabilidad de los puntajes del Eje 2 a través del tiempo. No obstante, la formación de grupos ecológicos permite la utilización de la técnica de análogos

modernos, la cual, como se explicó en la sección metodológica, fue elaborada a partir de los datos fósiles colectados en esta investigación y datos modernos publicados en Correa-Metrio et al. (2011 y 2013).

Los puntajes del DCA también permitieron la estimación del recambio ecológico a través del tiempo de acuerdo a las técnicas presentadas en Correa-Metrio et al. (2014a) y Urrego et al. (2009). Es interesante notar que los picos más altos de recambio ecológico marcaron la transición entre las zonas de polen identificadas (Fig. 17a y 17b), lo que sugiere que la transición entre estos periodos de grupos ecológicos relativamente estables se presentó de manera abrupta. Esta observación valida la interpretación de una transición abrupta entre condiciones contrastantes mediada por cambios aparentemente graduales en los factores de forzamiento, en este caso un enfriamiento global de sólo 1 °C (Jouzel et al. 2007). Igualmente, hacia el techo de la zona PI7-III (91.801 m) se presentó un tercer máximo de recambio ecológico de 1.1 DE, el cual coincide con aumentos sustanciales de *Quercus* y *Moraceae*. Los ensambles de polen posteriores a este pico sugieren la dominancia de un clima fresco (temperaturas medias y buena disponibilidad de humedad), el cual pudo representar el inicio de la terminación del interglacial.

5. 3. ANÁLOGOS MODERNOS

De acuerdo al modelo de mezcla de distribución construido a partir de las muestras modernas, las distancias entre no análogos representaron el 21.8% de las distancias entre localidades modernas. Esta cifra resulta un poco baja dado que se incluyeron en el modelo muestras modernas de dos regiones biogeográficamente contrastantes, como son el centro de México y la Península de Yucatán (Correa-Metrio et al. 2013). Sin embargo, en caso de que la cantidad de no análogos fuese una subestimación, favorece la interpretación ecológica dado que no se contaría con falsos positivos en el sentido de identificar como periodos no-análogos aquellos que sí lo son (Delcourt y Delcourt 1991).

Al aplicar la técnica de Análogos Modernos se encontró que todas las muestras fósiles tienen análogos con las comunidades vegetales del presente, pues ninguna muestra rebasó el umbral establecido de 324.4 unidades de distancia (Fig. 19). La secuencia de analogías fue consistente con la interpretación de la secuencia palinológica presentada en la sección 5. 2. La zona de polen PI7-I resultó análoga a los lagos Oquévix (Guatemala), Crooked Tree (Belice), Ocotitalito (Chiapas) y Tacámbaro (Michoacán) (Fig. 19). Una característica común entre estas localidades es su carácter cálido con una distribución relativamente estacional de las lluvias, condiciones inferidas para la zona de polen correspondiente.

Por su parte, los análogos para la zona de polen PI7-II estuvieron dominados por el Lago Parres, ubicado en el centro de México (Fig. 20). Este lago está ubicado en una cuenca caracterizada por matorrales, cuyos taxa dominantes pertenecen a

la familia Poaceae (INAFED 2010), un hallazgo consistente con la inferencia de dominancia de sabanas a través de esta zona. La transición hacia la zona PI7-III, así como esta última zona *per se*, estuvo dominada por espectros de polen similares a aquellos que dominan las Lagunas de Montebello y la Selva Lacandona en la actualidad (Fig. 20). Estas similitudes también resultaron consistentes con la temperatura y el clima inferidos para la zona polínica. La vegetación de las Lagunas de Montebello está constituida actualmente por elementos de clima templado, con *Pinus* siendo el género más abundante (CONANP-SEMARNAT 2007). Por su parte, la Selva Lacandona presenta hoy en día una vegetación de clima semicálido subhúmedo y templado subhúmedo con lluvias en verano (CONABIO 2012).

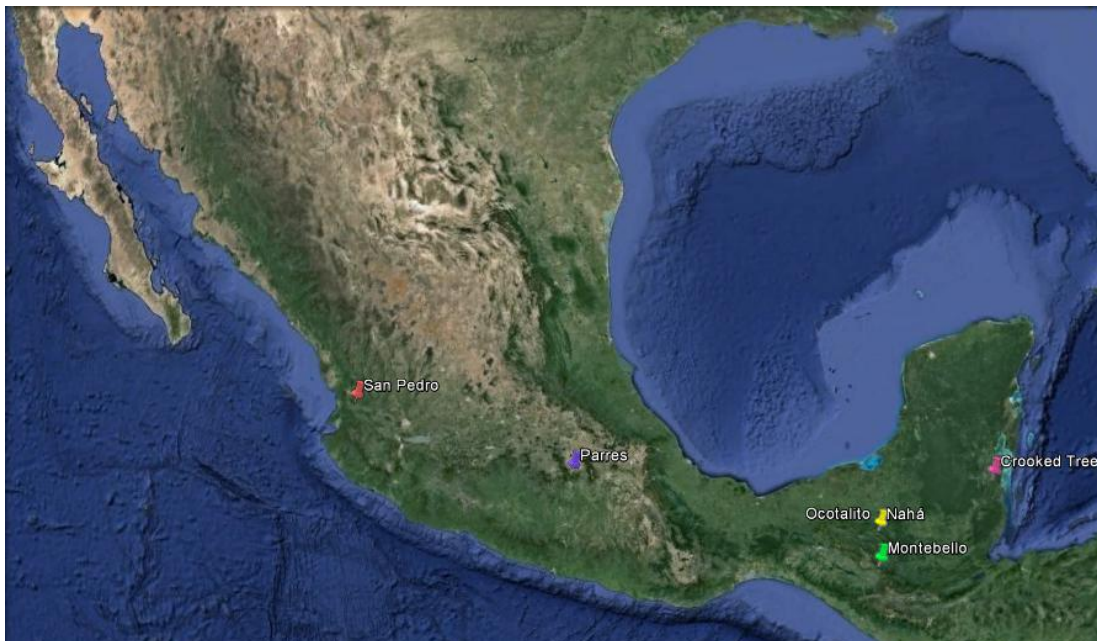


Figura 20. Principales lagos que mostraron analogía moderna para las muestras fósiles del Lago Peteén-Itzá

6. CONCLUSIONES

1. Aunque la secuencia analizada (103.598 a 90.002 metros bajo el suelo del lago), no ha sido completamente datada, el modelo cronológico arrojó una edad de ~220 399 a 191 442 años A. P., correspondiente al Estadio Isotópico Marino 7. A su vez se logró identificar tres etapas climáticas distintas (MIS 7.3, 7.2 y 7.1) y, por ende, tres momentos en la vegetación, identificados en este estudio como zonas PI7-I, PI7-II y PI7-III.
2. PI7-I presentó un espectro de polen dominado por elementos subtropicales como son *Quercus*, *Myrica* y *Pinus*. PI7-II estuvo dominado por elementos de clima seco como son Poaceae y Amaranthaceae. PI7-III, que se caracterizó por elementos de clima húmedo y cálido como *Celtis*, Melastomataceae, Bignoniaceae, y Moraceae.
3. En términos de temperatura, el registro indica un patrón aparente en la disminución en la temperatura desde 26 °C (PI7-I), una fluctuación entre 20 y 24 °C (PI7-II), y un descenso gradual hasta 19 °C (PI7-III). En cuanto a humedad, la vegetación mostró un periodo de extrema sequía (PI7-II), y dos de humedad, siendo PI7-III más húmedo que PI7-I, debido posiblemente a una menor tasa de evaporación ocasionada por una menor temperatura.
4. El patrón en los cambios en la vegetación pudo estar influenciado por el desplazamiento al norte de la ZITC, siendo así, la disponibilidad de humedad, el factor determinante para la variabilidad del periodo en estudio.

5. Se identificaron cuatro grupos ecológicos: sabana, bosque tropical caducifolio, bosque mesófilo de montaña y bosque húmedo tropical.
6. Los picos más altos de recambio ecológico marcaron la transición entre las zonas de polen identificadas, lo que sugiere que la transición entre estos periodos de grupos ecológicos se presentó de manera abrupta.
7. Todas las muestras fósiles presentaron análogos modernos. Los lagos más parecidos al registro fósil fueron Oquévix (Guatemala), Crooked Tree (Belice), Ocotitalito (Chiapas) y Tacámbaro (Michoacán) durante PI7-I. El Lago Parres en el Centro de México durante PI7-II. Las Lagunas de Montebello y la Selva Lacandona durante PI7-III.
8. Dados los resultados aquí presentados, se hace evidente la necesidad de estudiar registros sedimentarios con un alcance temporal a escalas milenarias para el mejor entendimiento del sistema climático global y su relación con las dinámicas de la vegetación.

7. REFERENCIAS

- Anselmetti, F. S., D. Ariztegui, D. A. Hodell, M. B. Hillesheim, M. Brenner, A. Gilli, J. A. McKenzie, and A. D. Mueller. 2006. Late Quaternary climate-induced lake level variations in Lake Petén Itzá, Guatemala, inferred from seismic stratigraphic analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **230**:52-69.
- Birks, H. J. B., and H. H. Birks. 1980. *Quaternary palaeoecology*. University Park Press, Baltimore.
- Birks, H. J. B., and A. D. Gordon. 1985. *Numerical Methods in Quaternary Pollen Analysis*. Academic Press, London.
- Bradley, R. S. 1999. *Paleoclimatology*. Academic Press, Burlington.
- Bradley, R. S. 2015. *Paleoclimatology Third edition*. Academic Press, San Diego.
- Bush, M. B. 1991. Modern pollen-rain data from South and Central America: A test of the feasibility of fine resolution lowland tropical palynology. *The Holocene* **1**:162-167.
- Bush, M. B. 2000. Deriving response matrices from Central American modern pollen rain. *Quaternary Research* **54**:132-143.
- Bush, M. B. 2002. On the interpretation of fossil Poaceae pollen in the lowland humid neotropics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **177**:5-17.
- Bush, M. B., and P. A. Colinvaux. 1990. A pollen record of a complete glacial cycle from lowland Panama. *Journal of Vegetation Science* **1**:105-119.
- Bush, M. B., A. Correa-Metrio, D. A. Hodell, M. Brenner, F. S. Anselmetti, D. Ariztegui, A. D. Muller, J. H. Curtis, C. Burton, and A. Gilli. 2009. Re-evaluation of climate change in Lowland Central America during the Last Glacial Maximum using new sediment cores from Lake Petén Itzá, Guatemala. Pages 113-128 in F. Vimeux, F. Sylvestre, and M. Khodri, editors. *Past climate variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene in South America and surrounding regions*. Springer.
- Bush, M. B., J. A. Hanselman, and W. D. Gosling. 2010. Nonlinear climate change and Andean feedbacks: an imminent turning point? *Global Change Biology* **16**:3223-3232.
- Cohen, K., S. Finney, P. Gibbard, and J.-X. Fan. 2013. The ICS international chronostratigraphic chart. *Episodes* **36**:199-204.
- CONABIO. 2012. *Lagos-Cráter de Nayarit*.
- CONANP-SEMARNAT. 2007. *Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello México*.
- Correa-Metrio, A. 2010. *Climate and vegetation of the Yucatan Peninsula during the Late Pleistocene*. Florida Institute of Technology. PhD dissertation, Melbourne FL.
- Correa-Metrio, A., M. B. Bush, K. R. Cabrera, S. Sully, M. Brenner, D. A. Hodell, J. Escobar, and T. Guilderson. 2012a. Rapid climate change and no-analog vegetation in lowland Central America during the last 86,000 years. *Quaternary Science Reviews* **38**:63-75.
- Correa-Metrio, A., M. B. Bush, D. A. Hodell, M. Brenner, J. Escobar, and T. Guilderson. 2012b. The influence of abrupt climate change on the ice-age vegetation of the Central American lowlands. *Journal of Biogeography* **39**:497-509.
- Correa-Metrio, A., M. B. Bush, M. S. Lozano-García, and S. Sosa-Nájera. 2013. Millennial-scale temperature change velocity in the continental northern Neotropics. *PLoS ONE* **8**:e81958.
- Correa-Metrio, A., M. B. Bush, L. Pérez, A. Schwab, and K. R. Cabrera. 2011. Pollen distribution along climatic and biogeographic gradients in northern Central America. *The Holocene* **21**:681-692.

- Correa-Metrio, A., K. R. Cabrera, and M. B. Bush. 2010. Quantifying ecological change through Discriminant Analysis: a paleoecological example from the Peruvian Amazon. *Journal of Vegetation Science* **21**:695-704.
- Correa-Metrio, A., Y. Dechnik, M. S. Lozano-García, and M. Caballero. 2014a. Detrended correspondence analysis: A useful tool to quantify ecological change from fossil data sets. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* **66**:135-143.
- Correa-Metrio, A., Y. Dechnik, S. Lozano-García, and M. Caballero. 2014b. Detrended correspondence analysis: A useful tool to quantify ecological changes from fossil data sets. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* **66**:135-143.
- Correa-Metrio, A., M. S. Lozano-García, S. Xeltzuantzi, and M. S. Sosa-Najera. 2012c. Vegetation in western central Mexico during the last 50 000 years: modern analogs and climate in Zacapu Basin. *Journal of Quaternary Science* **27**:509-518.
- Correa-Metrio, A., J. A. Meave, S. Lozano-García, and M. B. Bush. 2014c. Environmental determinism and neutrality in vegetation at millennial time scales. *Journal of Vegetation Science* **25**:627-635.
- Curtis, J. H., D. A. Hodell, and M. Brenner. 1996. Climate Variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the Past 3500 Years, and Implications for Maya Cultural Evolution. *Quaternary Research* **46**:37-47.
- Deevey, E. S., M. Brenner, and M. W. Binford. 1983. Paleolimnology of the Petén Lake District, Guatemala III: Late Pleistocene and Gamblian environments of the Maya area. *Hydrobiologia* **103**:211-216.
- Delcourt, H. R., and P. A. Delcourt. 1991. *Quaternary Ecology: A paleoecological perspective*. Chapman & Hall, Cornwall, UK.
- Desprat, S., M. F. Sánchez Goñi, J.-L. Turon, J. Duprat, B. Malaizé, and J.-P. Peyrouquet. 2006. Climatic variability of Marine Isotope Stage 7: direct land–sea–ice correlation from a multiproxy analysis of a north-western Iberian margin deep-sea core. *Quaternary Science Reviews* **25**:1010-1026.
- Domínguez-Vásquez, G., G. A. Islebe, and R. Villanueva-Gutiérrez. 2004. Modern pollen deposition in Lacandon forest, Chiapas, Mexico. *Review of Palaeobotany & Palynology* **131**:105-116.
- Duno-de Stefano, R., L. L. Can-Itza, A. Rivera-Ruiz, and L. M. Calvo-Irabién. 2012. Regionalización y relaciones biogeográficas de la Península de Yucatán con base en los patrones de distribución de la familia Leguminosae. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **83**:1053-1072.
- Emiliani, C. 1955. Pleistocene temperatures. *Journal of Geology* **63**:538– 578.
- EPICA Community Members. 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* **429**:623-628.
- EPICA Community Members. 2006. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* **444**:195-198.
- Escolero, O. A., L. E. Marin, B. Steinich, and J. Pacheco. 2000. Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: the Merida, Yucatan example. *Landscape and Urban Planning* **51**:53-62.
- Fernández Carnevali, G. C., J. L. T. Muñoz, R. D. d. Stefano, I. M. R. Morillo, L. Can-Itzá, S. H. Aguilar, and A. Castillo. 2012. La Flora de la Península de Yucatán Mexicana: 250 años de conocimiento florístico. CONABIO. *Biodiversitas*, **101**:6-10.
- Gavin, D. G., W. W. Oswald, E. R. Wahl, and J. W. Williams. 2003. A statistical approach to evaluating distance metrics and analog assignments for pollen records. *Quaternary Research* **60**:356-367.
- Groot, M. H. M., R. G. Bogotá, L. J. Lourens, H. Hooghiemstra, M. Vriend, J. C. Berrio, E. Tuenter, J. van der Plicht, B. van Geel, M. Ziegler, S. L. Weber, A. Betancourt, L. Contreras, S.

- Gaviria, C. Giraldo, N. González, J. H. F. Jansen, M. Konert, D. Ortega, O. Rangel, G. Sarmiento, J. Vandenberghe, T. van der Hammen, M. van der Linden, and W. Westerhoff. 2011. Ultra-high resolution pollen record from the northern Andes reveals rapid shifts in montane climates within the last two glacial cycles. *Climate of the Past* **7**:299-316.
- Hanselman, J. A., M. B. Bush, W. D. Gosling, A. Collins, C. Knox, P. A. Baker, and S. C. Fritz. 2011. A 370,000-year record of vegetation and fire history around Lake Titicaca (Bolivia/Peru). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **305**:201-214.
- Hill, M. O., and H. G. Gauch. 1980. Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. *Vegetatio* **42**:41-58.
- Hodell, D. A., F. Anselmetti, M. Brenner, D. Ariztegui, and P. S. Party. 2006. The Lake Petén Itzá Scientific Drilling Project. *Scientific Drilling* **3**:25-29.
- Hodell, D. A., F. S. Anselmetti, D. Ariztegui, M. Brenner, J. H. Curtis, A. Gilli, A. Grzesik, T. J. Guilderson, A. D. Müller, M. B. Bush, A. Correa-Metrio, J. Escobar, and S. Kutterolf. 2008. An 85-ka record of climate change in lowland Central America Quaternary Science Reviews **27**:1152-1165.
- ICDP. 2014. Profile. <http://www.icdp-online.org/profile/>.
- Imbrie, J., and J. Z. Imbrie. 1980. Modeling the Climatic Response to Orbital Variations. *Science* **207**:943-953.
- INAFED. 2010. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México.
- INSIVUMEH. 2010a. Estacion: Flores Petén, Aeropuerto Mundo Maya Acumulados Mensuales y Anuales de Precipitacion en milímetros (en mm). <http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/PETEN/Flores/Lluvia%20en%20mm%20FLORES.htm>.
- INSIVUMEH. 2010b. Estacion: Flores Petén, Aeropuerto Mundo Maya Datos Mensuales y Anuales de Temperatura Promedio en Grados Centígrados. <http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/PETEN/Flores/Temp%20Media%20FLORES.htm>.
- Islebe, G. A., H. Hooghiemstra, M. Brenner, J. H. Curtis, and D. A. Hodell. 1996. A Holocene vegetation history from lowland Guatemala. *The Holocene* **6**:265-271.
- Jouzel, J., V. Masson-Delmotte, O. Cattani, G. Dreyfus, S. Falourd, G. Hoffmann, B. Minster, J. Nouet, J. M. Barnola, J. Cappellaz, H. Fischer, J. C. Gallet, S. Johnsen, M. Leuenberger, L. Loulergue, D. Luethi, H. Oerter, F. Parrenin, G. Raisbeck, D. Raynaud, A. Schilt, J. Schwander, E. Selmo, R. Souchez, R. Spahni, B. Stauffer, J. P. Steffensen, B. Stenni, T. F. Stocker, J. L. Tison, M. Werner, and E. W. Wolff. 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science* **317**:793-796.
- Karner, D. B., and R. A. Muller. 2000. A Causality Problem for Milankovitch. *Science* **288**:2143-2144.
- Koeppen, W. 1948. *Climatología*. Page 478 pp. Fondo de Cultura Económica, México, D. F.
- Krukowski, S. T. 1988. Sodium metatungstate; a new heavy-mineral separation medium for the extraction of conodonts from insoluble residues. *Journal of Paleontology* **62**:314-316.
- Kutterolf, S., A. Freundt, W. Perez, T. Morz, U. Schacht, H. Wehrmann, and H.-U. Schmincke. 2008. The pacific offshore record of Plinian arc volcanism in Central America, part 1: along-arc correlations.
- Lang, N., and E. W. Wolff. 2011. Interglacial and glacial variability from the last 800 ka in marine, ice and terrestrial archives. *Climate of the Past* **7**:361-380.
- Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf, and H. J. Schellnhuber. 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. **105**:1786-1789.

- Leyden, B. W. 2002. Pollen evidence for climatic variability and cultural disturbance in the Maya lowlands. *Ancient Mesoamerica* **13**:85-101.
- Leyden, B. W., M. Brenner, D. A. Hodell, and J. A. Curtis. 1993. Late Pleistocene climate in the Central American lowlands. *Geophysical Monograph* **78**:165-178.
- Lopes dos Santos, R. A., M. Prange, I. S. Castañeda, E. Schefuß, S. Mulitza, M. Schulz, E. M. Niedermeyer, J. S. Sinninghe Damsté, and S. Schouten. 2010. Glacial-interglacial variability in Atlantic meridional overturning circulation and thermocline adjustments in the tropical North Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters* **300**:407-414.
- Lozano-Garcia, M. S. 2004. Evidencia de cambio climático: cambios en el paisaje. *Cambio climático: una visión desde México*. Ed. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.(México):65-76.
- Lozano-Garcia, M. S., and M. S. Xelhuantzi-López. 1997. Some problems with the late Quaternary pollen records of Central Mexico: Basins of Mexico and Zacapu. *Quaternary International* **43/44**:117-123.
- Lynch-Stieglitz, J., J. F. Adkins, W. B. Curry, T. Dokken, I. R. Hall, J. C. Herguera, J. J. M. Hirschi, E. V. Ivanova, C. Kissel, O. Marchal, T. M. Marchitto, I. N. McCave, J. F. McManus, S. Mulitza, U. Ninnemann, F. Peeters, E. F. Yu, and R. Zahn. 2007. Atlantic Meridional Overturning Circulation during the Last Glacial Maximum. *Science* **316**:66-69.
- Magaña, O. V., L. J. Vázquez, P. L. J., and B. J. Pérez. 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* **42**:313-330.
- Marchant, R., L. Almeida, H. Behling, J. C. Berrio, M. Bush, A. Cleef, J. Duivenvoorden, M. Kappelle, P. de Oliveira, A. T. de Oliveira-Filho, S. Lozano-Garcia, H. Hooghiemstra, M.-P. Ledru, B. Ludlow-Wiechers, V. Markgraf, V. Mancini, M. Paez, A. Preto, O. Rangel, and M. L. Salgado-Labouriau. 2002. Distribution and ecology of parent taxa of pollen lodged within the Latin American Pollen Database. *Review of Palaeobotany and Palynology* **121**:1-75.
- Meave, J., and M. Kellman. 1994. Maintenance of rain forest diversity in riparian forests of tropical savannas: implications for species conservation during Pleistocene drought. *Journal of Biogeography* **21**:121-135.
- Milankovitch, M. 1930. *Handbuch der Klimatologie*: Bd. 1, T. A. Bornträger.
- Mueller, A. D., F. Anselmetti, D. Ariztegui, M. Brenner, D. A. Hodell, J. H. Curtis, J. Escobar, A. Gilli, D. A. Grzesik, T. P. Guilderson, S. Kutterolf, and M. Plötze. 2010. Late Quaternary palaeoenvironment of northern Guatemala: evidence from deep drill cores and seismic stratigraphy of Lake Petén Itzá. *Sedimentology* **57**:1220-1245.
- NASA. 2000. The Intertropical Convergence Zone. GOES Project Science <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=703>.
- Overpeck, J. T., T. I. Webb, and I. C. Prentice. 1985. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: Dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. *Quaternary Research* **23**:87-708.
- Peterson, L. C., and G. H. Haug. 2006. Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **234**:97-113.
- Peterson, L. C., G. H. Haug, K. A. Hughen, and U. Röhl. 2000. Rapid changes in the Hydrologic cycle of the Tropical Atlantic during the Last Glacial. *Science* **290**:1947-1951.
- Rintoul, S. R., M. Balmeseda, S. Cunningham, B. Dushaw, S. Garzoli, A. Gordon, P. Heimbach, M. Hood, G. Johnson, M. Latif, U. Send, C. Shum, S. Speich, and D. Stammer. 2010. Deep circulation and meridional overturning: Recent progress and a strategy for sustained observations. *Proceedings of the "OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society" Conference* **1**:pp. 32.

- Rodgers, J. C., and S. P. Horn. 1996. Modern pollen spectra from Costa Rica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **124**:53-71.
- Rose, W. I., F. M. Conway, C. R. Pullinger, A. Deino, and W. C. McIntosh. 1999. An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America. *Bulletin of Volcanology* **61**:106-120.
- Rull, V. 2009. Microrefugia. *Journal of Biogeography* **36**:481-484.
- Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. Page 504 pp. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México D.F.
- Salguero, B. M. R. 2009. *Gobernabilidad del Agua en Guatemala: El caso del lago Petén Itzá*. Editorial de Ciencias Sociales, Guatemala.
- Sánchez-del Pino, I., F. O. H., and J. Valdés. 1999. La familia Amaranthaceae en la flora halófila y gipsófila de México. *Anales del Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México* **70**:29-135.
- Shackleton, N. J. 1967. Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures re-assessed. *Nature* **215**:15-17.
- Shackleton, N. J., M. F. Sánchez-Goñi, D. Pailler, and Y. Lancelot. 2003. Marine Isotope Substage 5e and the Eemian Interglacial. *Global and Planetary Change* **36**:151-155.
- Simpson, G. L. 2007. Analogue methods in palaeoecology: using the analogue package. *Journal of Statistical Software* **22**:1-29.
- Stockmarr, J. 1972. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et Spore* **XIII**:615-621.
- Tzedakis, P. C., J. F. McManus, H. Hooghiemstra, D. W. Oppo, and T. A. Wijmstra. 2003. Comparison of changes in vegetation in northeast Greece with records of climate variability on orbital and suborbital frequencies over the last 450 000 years. *Earth and Planetary Science Letters* **212**:197-212.
- Urrego, D. H., M. B. Bush, M. R. Silman, A. Correa-Metrio, M.-P. Ledru, F. E. Mayle, G. Paduano, and B. G. Valencia. 2009. Millennial-scale ecological changes in tropical South America since the Last Glacial Maximum. Pages 283-300 *in* F. Vimeux, F. Sylvestre, and M. Khodri, editors. *Past climate variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene in South America and surrounding regions*. Springer-Verlag.
- Wang, C.-c., and G. Magnusdottir. 2006. The ITCZ in the Central and Eastern Pacific on Synoptic Time Scales. *Monthly Weather Review* **134**:1405-1421.
- Wang, C., D. B. Enfield, and S. K. Lee. 2011. Impacts, Mechanisms and Predictability of the Atlantic Warm Pool. NOAA, AOML.
- Wang, C., and S.-K. Lee. 2007. Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes *Geophysical Research Letters* **34**:L02703.
- Williams, J. W., J. L. Blois, and B. N. Shuman. 2011. Extrinsic and intrinsic forcing of abrupt ecological change: case studies from the late Quaternary. *Journal of Ecology* **99**:664-677.
- Zachos, J., M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas, and K. Billups. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* **292**:686-693.

