



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

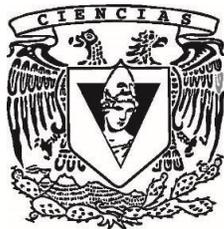
## FACULTAD DE CIENCIAS

Asociación ecológica de diatomeas en lago de  
Coatetelco Morelos, para identificar las variaciones  
climáticas en el Holoceno tardío.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
Licenciada en Ciencias de la Tierra.

P R E S E N T A:  
Mercedes Guadalupe Vázquez Romero



DIRECTOR DE TESIS:  
Dra. Margarita Erna Caballero Miranda



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## Contenido

Resumen.....	5
<b>1 Introducción.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.1 Objetivo general.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.2 Objetivos Particulares .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Justificación.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3 Hipótesis .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Antecedentes.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Clima de México.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Clima de los últimos 2000 años .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1 Sequia del Clásico Terminal (750 a 900 d.C.).....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2 Anomalía Climática Medieval .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3 Pequeña Edad de Hielo (PEH). .....</b>	<b>20</b>
<b>3 Zona de estudio.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Localización geográfica del lago de Coatetelco .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Características del Lago de Coatetelco.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Desarrollo histórico de la zona.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.1 Xochiclaco .....</b>	<b>25</b>
<b>4 Materiales y Métodos.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Recuperación de la secuencia sedimentaria.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2 Modelo de edad.....</b>	<b>28</b>
<b>4.3 Procesamiento de muestras.....</b>	<b>28</b>
<b>4.4 Análisis geoquímico.....</b>	<b>29</b>
<b>4.5 Análisis al microscopio.....</b>	<b>29</b>
<b>4.6 Análisis de correspondencia sin tendencia (DCA).....</b>	<b>30</b>
<b>4.7 Diatomeas como paleoindicadores en el lago de Coatetelco.....</b>	<b>31</b>
<b>4.7.1 Clasificación de las diatomeas .....</b>	<b>32</b>
<b>4.7.2 Ecología de las diatomeas .....</b>	<b>33</b>
<b>5 Resultados.....</b>	<b>35</b>
<b>5.1 Descripción de la secuencia y modelo de edad. ....</b>	<b>35</b>
<b>5.2 Geoquímica .....</b>	<b>37</b>
<b>5.3 Resultados del análisis de diatomeas.....</b>	<b>38</b>
<b>5.3.1 Taxonomía y distribución estratigráfica .....</b>	<b>38</b>
<b>5.3.2 Resultados del DCA.....</b>	<b>50</b>

<b>5.4 Descripción de las zonas de la secuencia .....</b>	<b>52</b>
<b>5.4.1 Zona I.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3.2. Zona II.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3.3 Zona III. ....</b>	<b>54</b>
<b>6 Discusión. ....</b>	<b>55</b>
<b>6.1 Periodos de cambio ambiental.....</b>	<b>55</b>
<b>6.2 Comparación con otros estudios paleo - climáticos.....</b>	<b>59</b>
<b>7 Conclusiones.....</b>	<b>63</b>
Referencias .....	65

## Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme brindado educación durante mi formación académica de medio superior y superior. Estaré eternamente agradecida con las aulas de la máxima casa de estudios, sin duda mi paso por ellas ha sido la mejor experiencia de mi vida. ¡Gracias por brindarme una educación de calidad!

A la Facultad de Ciencias de la UNAM por ser cuna de mi conocimiento científico. A mis profesores por brindarme parte de su experiencia y sabiduría para alimentar mi vocación científica y formarme como una profesionista, con las capacidades y habilidades de un geo científico.

Al instituto de Geofísica de la UNAM por abrirme las puertas de sus instalaciones y sus laboratorios para poder llevar a cabo mi trabajo de titulación.

A la Dra. Margarita Erna Caballero Miranda por su apoyo incondicional en todo momento durante el proceso de titulación. Gracias por sus aportaciones de conocimiento, experiencia y sabiduría para llevar a cabo este trabajo de tesis de manera exitosa. Sus consejos en todo momento me ayudaron para concluir exitosamente.

A mis sinodales por sus consejos, apoyo, paciencia y observaciones en este trabajo de tesis que ayudaron a mejorarla.

A mis amigos y compañeros de la carrera por ser parte de mi desarrollo profesional y personal, por esas largas horas de estudio y claro gracias también por las risas y momentos inolvidables. Conocerlos fue otra gran regalo de la universidad. A mis amigas Astrid, Elisa y Mitzi gracias por alentarme a continuar y no rendirme sin importar los obstáculos que se presentaran. Sus palabras de aliento en todo momento me ayudaron para no rendirme.

A toda mi familia, tíos, primos, hermanos y abuelos, que creyeron en mi para poder cumplir mi más grande sueño y anhelo. Su apoyo incondicional no ha sido solo durante mi proceso de titulación, si no durante toda mi vida, gracias por siempre estar presentes.

Y principalmente quiero agradecer a mi padre por brindarme todas las herramientas y apoyo en todo momento para lograr el termino de mi carrera profesional, gracias a sus consejos, apoyo, ejemplo y cariño hoy logro concluir esta etapa universitaria.

## Resumen

En esta tesis se presentan los resultados del análisis de diatomeas realizado en una secuencia sedimentaria de 2.60 m de largo, recuperada en el lago de Coatetelco, Morelos en el año 2015. El objetivo del estudio fue identificar cambios en las asociaciones de diatomeas preservadas en los sedimentos que indiquen variaciones climáticas durante el Holoceno tardío. En particular, para identificar periodos de sequias intensas en el centro de México. El modelo de edad de la secuencia estudiada se estableció con base en tres muestras de sedimento datadas con el método de  $^{14}\text{C}$ . Además de las diatomeas, también se utilizaron datos de dos indicadores geoquímicos: el contenido de Ti como un indicador de escorrentía y la relación Ca/Ti como un indicador de evaporación. Se realizó un análisis de correspondencia sin tendencia (DCA) para identificar las asociaciones ecológicas de diatomeas y establecer la zonificación del núcleo. Como resultado, se identificaron dos conjuntos de diatomeas y se estableció la división del núcleo en tres zonas. El primer conjunto de diatomeas es dominado por *Aulacoseira granulata* y sugiere aguas más profundas. El segundo conjunto es dominado por *Fragilaria capucina* y *Nitzschia amphibia* y sugiere aguas más someras y concentradas. Las tres zonas fueron: Zona I (258 - 170 cm), que abarca los años 130 a.C. a 750 d.C. y en general domina *A. granulata* indicando aguas relativamente profundas. La Zona II (170 - 50 cm), que abarca entre 750 a 1570 d.C., tiene una mala preservación de diatomeas y en general domina el conjunto de *F. capucina* y *N. amphibia* indicando niveles

lacustres más bajos. Zona III (50 a 0 cm), que abarca entre 1570 a 1960 d.C. donde vuelve a dominar *A. granulata* acompañada de *N. amphibia*, sugiriendo condiciones intermedias de nivel lacustre.

La secuencia permite documentar las variaciones climáticas de los últimos 2000 años, en las que se logró identificar satisfactoriamente un periodo de sequias extremas en la región entre 750 a 1570 d.C., d.C., que corresponde con el periodo conocido como Sequia del Clásico Terminal (SCT) entre 770 a 900 d.C. en Mesoamérica que es seguido por un periodo de condiciones cálidas que en Europa se conoce como la Anomalía Climática Medieval (ACM) datada entre 900 a 1300 d.C. También se logró identificar una señal de sequía que coincide con el periodo conocido en Europa como la Pequeña Edad de Hielo (PEH), con dos fases, la primera y más intensa entre 1440 d.C. a 1500 d.C. y la segunda menos intensa entre 1702 -1767 d.C., el final de la PEH se identificó a los 1870 d.C.

## **1 Introducción.**

El Holoceno es la última época del período Cuaternario, comenzó alrededor de 11.7 ka A.P., después del evento frío Younger Dryas, y se ha caracterizado por un clima generalmente cálido (Dansgaard et al., 1989; Alley et al., 2010 ; Mayewski et al, 2004; Wanner et al., 2008; Wanner et al., 2011). Durante el Holoceno se ha dado el desarrollo de las sociedades y culturas humanas (Wanner et al., 2011), por lo que conocer su variabilidad climática resulta relevante para entender las posibles interacciones entre el clima y el desarrollo cultural humano. En una escala de tiempo milenaria, el clima del Holoceno estuvo dominado por el forzamiento orbital de la insolación de verano. La insolación del hemisferio norte disminuyó en casi 40 W/m<sup>2</sup> y por el contrario ocurrió una creciente insolación en el hemisferio sur (Wanner et al., 2011). Esta redistribución de energía condujo a una migración hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y a un debilitamiento de los sistemas monzónicos de verano en el hemisferio norte (Braconnot et al., 2007; Wanner et al., 2011), generando una tendencia hacia climas más secos en este hemisferio hacia finales del Holoceno.

Pero en una escala de tiempo decadal a centenaria, el clima del Holoceno fluctuó entre condiciones levemente más cálidas a frías, y entre condiciones húmedas a áridas (Denton y Karlén, 1973; Wanner et al., 2011). Esta variabilidad climática se asocia a procesos como cambios en la actividad solar, cambios en la dinámica del flujo de aguas marinas profundas, con una desaceleración de la circulación termohalina, y cambios en la temperatura superficial del mar (Emile et al., 2007; Wanner et al., 2011). Adicionalmente se cuenta con registros de una serie de erupciones volcánicas a finales del Holoceno que también pudieron contribuir a esta variabilidad climática.

Los registros paleo climáticos de muchas partes del mundo aportan evidencias sobre la variabilidad ambiental del Holoceno. Sin embargo, la magnitud, duración y los posibles mecanismos de cambio climático en cada lugar no están del todo claros, especialmente para las latitudes tropicales, donde hay menos registros continentales que en latitudes más elevadas (Maasch et al., 2005; Mann 1999). En México, en los últimos 2000 años se han identificado periodos de variaciones climáticas que tuvieron un impacto en escala regional. Una de estas variaciones climáticas son las Sequías del Clásico Terminal (SCT) que ocurrieron aproximadamente entre 750 y 900 d.C., (Hodell et al., 2005). Este periodo se caracterizó por una disminución en la precipitación que coincide con el declive de la civilización maya en Yucatán y con el de otras civilizaciones en el resto de Mesoamérica. Posterior a este evento de sequía en Mesoamérica, se registra un evento cálido en Europa llamado Anomalía Climática Medieval (ACM), entre 900 a 1300 d.C., que se identifica como una etapa más cálida asociada con un aumento en la radiación solar (Uriarte, 2010). Otra variación climática importante de la que se tiene registro en México durante los últimos 2000 años es La Pequeña Edad de Hielo (PEH). Este periodo, muy bien documentado para Europa, abarcó desde el siglo XV hasta mediados del XIX (Mann et al. 2009) y se caracterizó por dos periodos de enfriamiento, que algunos autores consideran que coinciden con los mínimos solares de Spörer (1420-1560) y Mounder (1650-1750) (Lozano et al., 2007).

Pero para estudiar el clima en el pasado hay que comprender cuáles son los factores que lo controlan, considerando que el clima no solo varía de un lugar a otro, sino que también es naturalmente variable en el tiempo. El clima debe entenderse como una interacción entre el Sol, la atmosfera, los océanos, los

casquetes polares, la Tierra sólida, y también todas las formas de vida, incluyendo el hombre. El clima comprende la interacción de todos estos subsistemas terrestres, por lo tanto, debe ser estudiado con un enfoque multidisciplinario. Debido a su complejidad, entender el funcionamiento de cada uno de los elementos del sistema climático requiere del estudio de la variabilidad climática pasada (IPCC, 2001). Entre los archivos o registros paleo climáticos más comúnmente usados se encuentran los sedimentos del mar profundo, los anillos de crecimiento de árboles, las bandas de crecimiento de corales, los núcleos de hielo y los depósitos minerales en cuevas (estalagmitas y estalactitas) (Uríarte, 2010). Pero sin duda una de las mejores herramientas para estudiar estos cambios de clima en el pasado es el análisis de los sedimentos lacustres (paleo limnología) ya que los lagos funcionan como trampas sedimentarias que guardan información de cambios ambientales a nivel regional y global (Caballero y Maidana 2017).

Comprender la variabilidad climática del pasado es relevante para entender mejor las condiciones climáticas actuales, y el clima que está por venir para la humanidad y la Tierra. Es por ello que en este trabajo se presenta un estudio paleo-ambiental y paleo-climático de una secuencia sedimentaria lacustre. La secuencia estudiada proviene del lago de Coatetelco, Morelos, y abarca los últimos 2000 años del Holoceno. En esta secuencia, mediante el estudio de las asociaciones ecológicas de diatomeas y de indicadores geoquímicos (Ti y Ca/Ti), se identificaron evidencias de variaciones climáticas importantes que corresponden con la SCT, la ACM y la PEH, descritas anteriormente.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general.**

Identificar cambios en las asociaciones de diatomeas y el registro geoquímico (Ti y Ca) preservados en los sedimentos del lago Coatetelco, que indiquen cambios en las condiciones ecológicas del lago que puedan asociarse con variaciones climáticas durante los últimos años del Holoceno, en particular con periodos de sequias intensas para el centro de México.

## 1.1.2 Objetivos Particulares

- Identificar el periodo seco conocido como la SCT en la secuencia sedimentaria e identificar las condiciones climáticas dominantes en la región de Coatetelco para evaluar los efectos que pudo tener en la zona.
- Realizar una correlación entre los datos de diatomeas y los datos geoquímicos (Ti y Ca) del registro para sustentar las interpretaciones paleo ambientales.
- Comparar el registro de Coatetelco con los datos de otros registros en el centro de México, como el de la cuenca de Lerma y el del lago cráter Aljojuca, para identificar tendencias regionales.

## 1.2 Justificación

México es un país con una gran diversidad cultural y una historia muy rica ya que se han establecido diferentes civilizaciones en distintos periodos. En el periodo Clásico que abarca de 200 - 950 d.C., (Sharer, 1999) en el centro de México, se desarrolló, por ejemplo, la cultura teotihuacana con su máximo apogeo entre los años 300 a 600 d.C. (Cohen y Crane, 2007; Márquez y Hernández, 2004; Márquez y Hernández, 2006 ). El colapso de esta gran cultura coincide con el apogeo de diversos centros locales como Cacaxtla, en Tlaxcala, Tajín, en Veracruz o Xochicalco, en Morelos, entre 600 a 900 d.C. (Sharer, 1999). Sin embargo, para el año 900 d.C. ocurre el abandono de estas grandes ciudades en el centro de México, incluyendo Xochicalco (Hernández y Márquez, 2013) y también el de las grandes ciudades mayas en Yucatán. Es de gran interés comprender las fluctuaciones climáticas del Holoceno tardío en México, en el contexto del auge y declive de las grandes culturas Mesoamericanas, entre ellas las teotihuacana y maya.

En los lagos se preserva un buen registro sedimentario ya que son ambientes de depósito continuo, que nos brindan información de cambios ambientales. Debido a esto, el estudio de los sedimentos lacustres es una herramienta fundamental para analizar las variaciones climáticas. En el presente trabajo se planea analizar los sedimentos del lago de Coatetelco, Morelos, localizado a 13 km al sur de la zona

arqueológica de Xochicalco. El estudio de los sedimentos de este lago brindará información que permitirá delimitar las condiciones climáticas y ambientales durante el establecimiento de la ciudad de Xochicalco y su posterior declive, al final de período Clásico en Mesoamérica, durante la Sequía del Clásico Terminal.

La mayoría de los estudios realizados para del Clásico Terminal (750 a 900 d.C.) se han situado principalmente en la península de Yucatán y la región del golfo de México (Márquez y Hernández, 2013). El realizar esta investigación en un lago del centro del país ayudara a tener una visión más amplia de las condiciones climáticas locales y regionales durante este periodo. Con la información paleo - climática obtenida en este estudio, comparada con los resultados de estudios ya existentes, se permitirá entender mejor la variabilidad climática regional en el centro de México durante el final del Holoceno.

### **1.3 Hipótesis**

Las culturas establecidas en el centro de México durante el periodo Clásico se vieron obligadas a abandonar sus grandes ciudades durante episodios climáticos cálidos y secos, debido a que su base cultural era la agricultura y las sequias prolongadas afectaron su estabilidad económica y social. Se espera que en el registro de Coatetelco, Morelos, se encuentren evidencias de niveles lacustres bajos en sedimentos que daten del Clásico Terminal (750 - 900 d.C.) y por ende aporten evidencia de la existencia en esta zona de condiciones de sequía durante el período del abandono de una gran metrópoli Mesoamericana como lo fue Xochicalco.

### **1.4 Antecedentes**

La sequía del Clásico Terminal se ha registrado en distintos estudios paleo-climáticos de México y Mesoamérica uno ellos es el registro paleo-limnológico de Aljojuca en el estado de Puebla, así como también en estudios realizados en la cuenca del alto Lerma (Caballero et al., 2002; Lozano et al., 2005), en el sureste en dos lagos de la península de Yucatán en Cichancanab (Hodell et al. 2005) y Punta Laguna (Hodell et al. 2007), así como en la parte occidental del centro de México, en Santa María del Oro, Nayarit (Rodríguez et al. 2015). Adicionalmente también se

ha identificado en un registro de espelotema en Guerrero de la cueva Juxtlahuaca (Lachniet et al., 2012).

Estos estudios muestran similitudes entre sí, principalmente muestran una sequía prolongada entre 600 a 900 d.C., que corresponde a la SCT y que en algunos registros se extiende hasta el 1100 d.C.

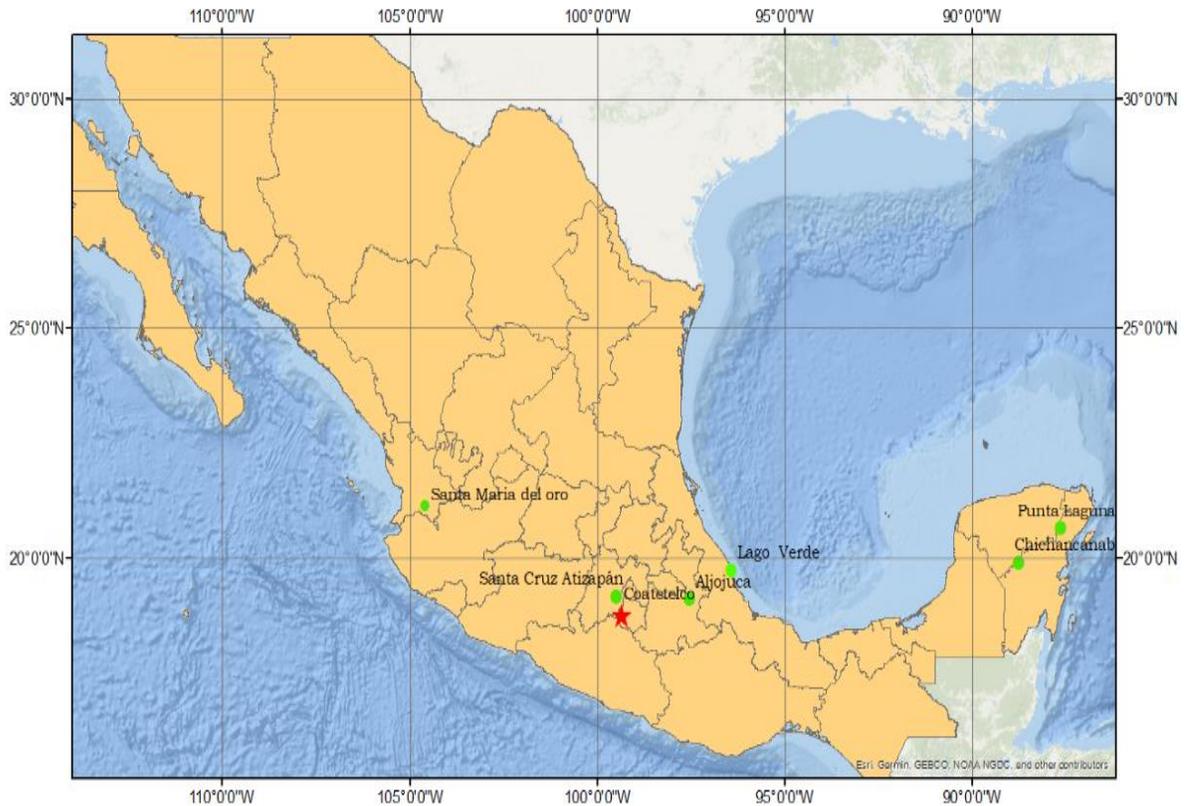


Figura1. Mapa de localización de los registros paleo – limnológicos mencionados en el texto .Se resalta Coatepec Morelos con una estrella roja.

En el registro del lago de Aljojuca, ubicado en la cuenca de Oriental, Puebla, al este Cinturón Volcánico Trans - Mexicano (CVTM), (Fig.2) (Bhattacharya et al., 2015), se utilizó el elemento Al como indicador geoquímico de aporte de sedimentos al lago y la señal isotópica  $\delta^{18}\text{O}$  como indicador de evaporación/precipitación. Este registro cuenta con una alta resolución en escala centenaria, obteniéndose valores mínimos de Al entre y valores altos de  $\delta^{18}\text{O}$  entre 600 a 950 d.C. Estos datos muestran una etapa de aridez máxima durante este intervalo (Fig.2)

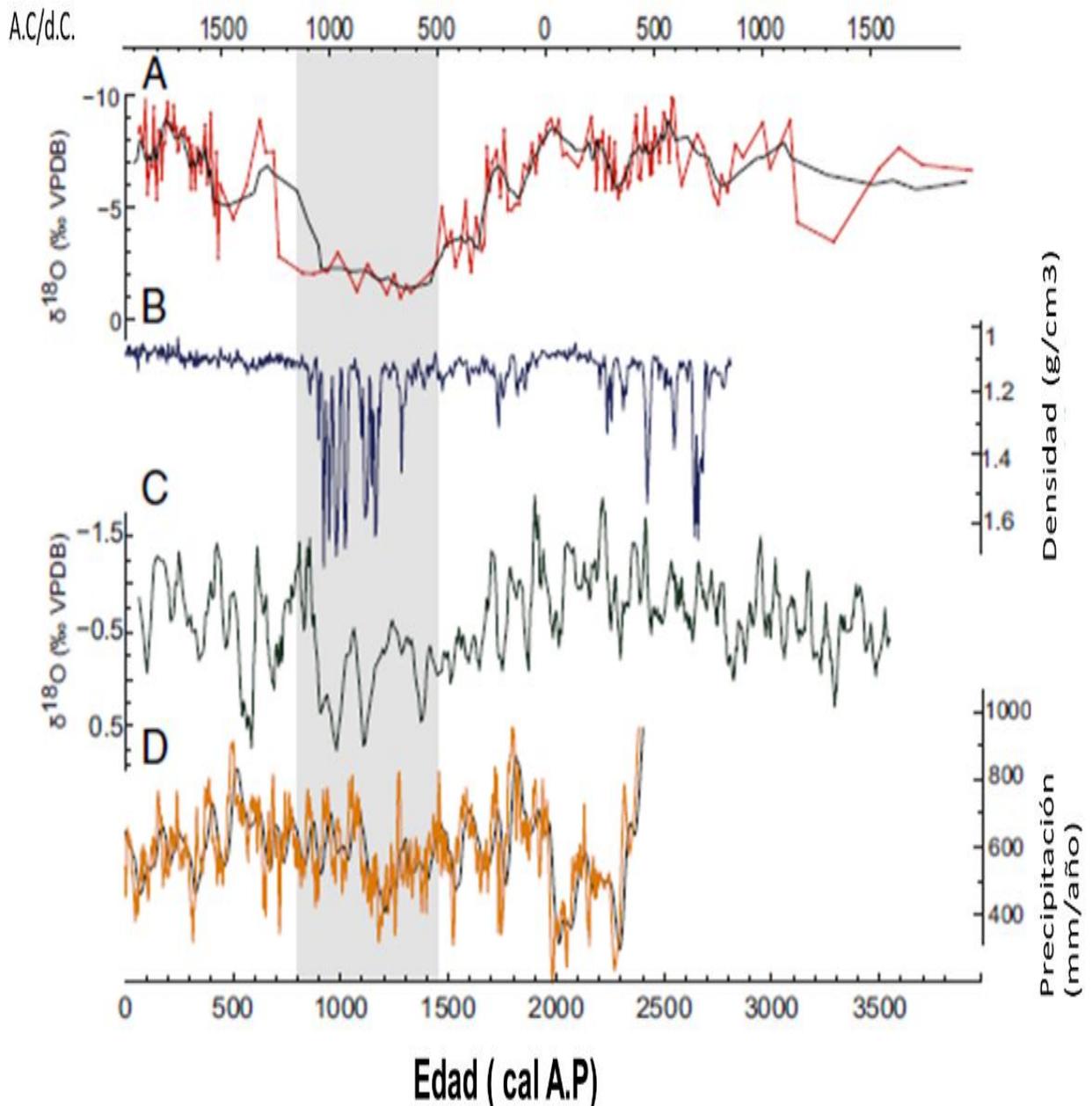


Fig2 . Principales registros paleoambientales de los últimos 3,500 años para México. A ) Registro de  $\delta^{18}\text{O}$  del Aljojuca, Puebla, (Bhattacharya et al. 2015). B) Registro de densidad del sedimento de Chichancanab, Yucatan, (Hodell et al. 2005), C) Registro de  $\delta^{18}\text{O}$  de Punta Laguna, Quintana Roo (Hodell et al., 2007) D) Reconstrucción de precipitación basada en datos de  $\delta^{18}\text{O}$  de una espeleotema de la cueva Juxtlahuaca, Guerrero (Lachniet et al., 2012). Tomada de (Bhattacharya et al. 2015).

En la cuenca de alto Lerma en Sta. Cruz Atizapán se registraron condiciones de agua poco profunda en el lago Chignahuapana entre 550 a 900 d.C., esto se infirió a partir de la presencia de diatomeas como *Cocconeis placentula* var. *linneata* y *Nitzschia amphibia*. El registro de Chignahuapan sugiere que el periodo Clásico fue relativamente seco, particularmente al final de este período, y las condiciones de niveles lacustre bajos permitieron la presencia de asentamientos humanos sobre montículos en el lago Chignahuapan. Las islas artificiales se construyeron directamente sobre los sedimentos lacustres cuando el nivel del lago descendió lo suficiente ~ 550 d.C. (Caballero et al., 2002). La presencia polen de *Zea mays* y abundantes partículas de carbón vegetal a partir de 600 d.C. (Lozano et al., 2005) corroboraran la idea de asentamientos humanos sobre los sedimentos lacustres a final del periodo Clásico.

En Chichancab, Yucatán, se obtuvo información detallada sobre el cambio de densidad en los sedimentos por la deposición de yeso, que permite identificar fases de sequía (Hodell et al., 2005). Las capas de yeso en Chichancanab fueron depositadas durante Clásico Terminal entre 600–950 d.C. (Fig.2). Por otro lado en el registro de  $\delta^{18}\text{O}$  de Punta Laguna (Hodell et al. 2007), que se encuentra a 150 km al oeste de Chichancanab, muestra aumentos en los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  durante el Clásico Terminal, entre 750 a 850 d.C., 910 a 990 d.C. y 1060 a 1100 d.C.,(Fig.2) demostrando que la SCT se conformó por una serie de eventos secos sucesivos, una señal que también se registró en el lago de Chichancanab (Hodell et al., 2005), y que se prolongaron hasta 1100 d.C.

En un estudio realizado en Santa María del Oro (SMO) en el estado de Nayarit, basado en análisis geoquímicos (carbonatos y Ti), de ostrácodos y la presencia diatomeas bentónicas (*Eolimna minima*), también brinda evidencia clara de un periodo seco entre 500 a 1000 d.C., con el intervalo más intenso entre 600 a 800 d.C. Este período seco del Clásico Terminal es la señal climática más importante en la región de Mesoamericana durante los últimos 2000 años del Holoceno (Rodríguez et al., 2015). En SMO también se identificó una sequía durante el inicio de la PEH entre 1400 a 1550 d.C. y un tercer periodo seco, pero menos intenso durante la segunda parte de la PEH alrededor de 1690 a 1770 d.C., en un patrón que sigue los mínimos en la actividad solar de Spörer y Mounder (Rodríguez et al. 2015).

La SCT no solo se ha podido documentar en registros paleo limnológicos sino que también se ha podido documentar en un registro de espeleotema perteneciente a la cueva Juxtlahuaca en Guerrero (Lachniet et al., 2012) ubicada a 250 km de la ciudad de México. En este registro el  $\delta^{18}\text{O}$  se utilizó como indicador de la cantidad de lluvia pasada (Lachniet et al., 2009), para demostrar la hipótesis de una sequía durante los cambios culturales en Mesoamérica a finales del Clásico a partir de una reconstrucción de precipitación. Se identificó una sola sequía en el Clásico tardío que comenzó ~ 690 d.C. y alcanzando un máximo en 770 d.C., y culminó en 860 d.C. (Fig. 2) (Lachniet et al., 2012).

En esta sección hemos revisado las evidencias de cinco registros paleolimnológicos y de una espeleotema (Fig. 2), que coinciden en mostrar evidencias de un periodo seco entre aproximadamente 700 – 900 d.C., durante el Clásico tardío, que afectó a gran parte de Mesoamérica

## 2 Clima de México

México se encuentra en el hemisferio Norte y se extiende desde el paralelo 14° 30' N hasta el 32° 43' N. La altitud y latitud juegan un papel importante en la diversidad de las condiciones climáticas de México (Metcalf et al., 2000), así como también la orografía, ya que las montañas actúan como barreras que impiden la penetración de humedad (García, 2003). Debido a esto, el clima en México es muy variable a lo largo de su territorio, con climas desérticos en el norte y selvas tropicales en el sur, así como también climas fríos de alta montaña debido a la influencia de la orografía.

Hay tres características atmosféricas importantes que determinan el tipo de clima en la mayor parte de México: (1) Los vientos alisios que convergen en la ZCIT; (2) el inicio y duración del Monzón Norteamericano (MNA); y (3) la localización, extensión e intensidad de los centros subtropicales de alta presión (CSAP) tanto del Atlántico como del Pacífico.

México está rodeado por dos grandes océanos, el Pacífico y el Atlántico y gran parte de las precipitaciones que recibe el país se deben a la influencia de los ciclones tropicales (huracanes) que cruzan estas masas de agua durante el verano y parte del otoño. Los ciclones tropicales tienen su mayor frecuencia en septiembre, y afectan las condiciones del clima del país debido a que muchas de sus trayectorias corren paralelas a la costa o se internan en el continente (García, 2003). En el norte de México también se tiene la influencia de los “vientos del Oeste” (Westerlies en Inglés) (Fig.3).

La posición de la ZCIT para México es de suma importancia ya que aporta precipitaciones de verano en el centro y sur del país. Durante el verano, el hemisferio norte se calienta y la ZCIT se desplaza hacia el norte hasta que ocupa una posición cerca de las costas del golfo de Tehuantepec, por lo que las lluvias de verano para México son debidas en gran parte a esta migración estacional de la ZCIT (Fig.2). Los vientos del este dominan en el verano trayendo humedad del golfo de México (Mosiño y García, 1974; Metcalf et al., 2000).

El MNA se presenta entre los meses de junio y julio y se puede extender hasta septiembre. Es generado por la insolación sobre Norteamérica que favorece el desarrollo de bajas presiones sobre el continente y el flujo de vientos cálidos y

húmedos con transporte de humedad provenientes del océano Pacífico y golfo de California por el oeste y desde el golfo de México por el este (Metcalf et al., 2000).

Las CSAP se asocian con condiciones de sequía. El cambio estacional en la insolación y ubicación latitudinal de las CSAP trae cambios en la disponibilidad de humedad que afectan la mayor parte de México. Por lo tanto, la precipitación en México esta modulada por la posición de la ZCIT y las CSAP, la intensidad e inicio del NAM, (Metcalf et al., 2000) y las precipitaciones asociadas de los ciclones tropicales. Sin embargo, durante el invierno los vientos “Nortes”, que se originan por el desplazamiento hacia el sur de masas de aire polar, también producen precipitaciones abundantes en el centro y sur del país ya que recogen humedad del golfo de México.

Como consecuencia del efecto de todos los factores descritos anteriormente, en la mayor parte de la República mexicana, la temporada lluviosa se presenta durante el verano, de mayo a octubre, con la dominancia de los vientos del este y asociada también con la ubicación norte de la ZCIT y el inicio del MNA (Rodríguez et, al. 2015). Por otra parte, hay una temporada de secas en invierno asociada con la migración al sur tanto de la ZCIT como de las CSAP. Solo en una pequeña área del noroeste de México domina el clima con lluvias en invierno (García, 2003) por la influencia de los vientos del oeste.

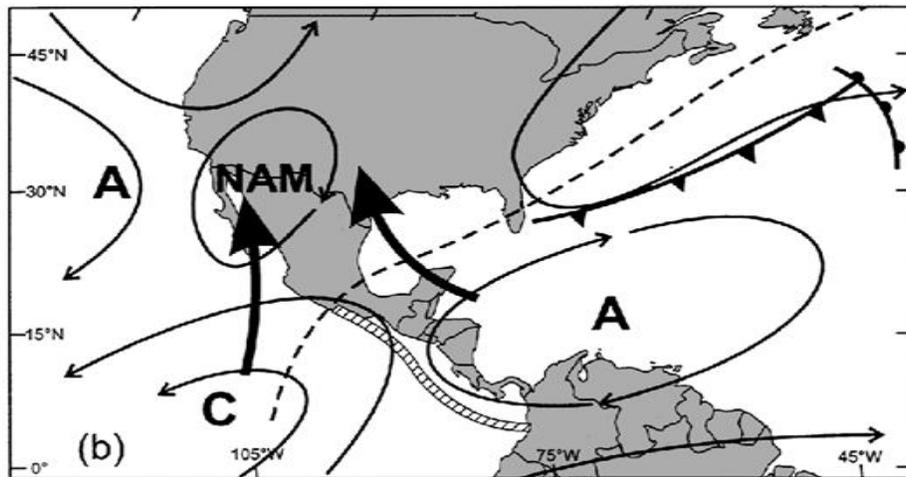
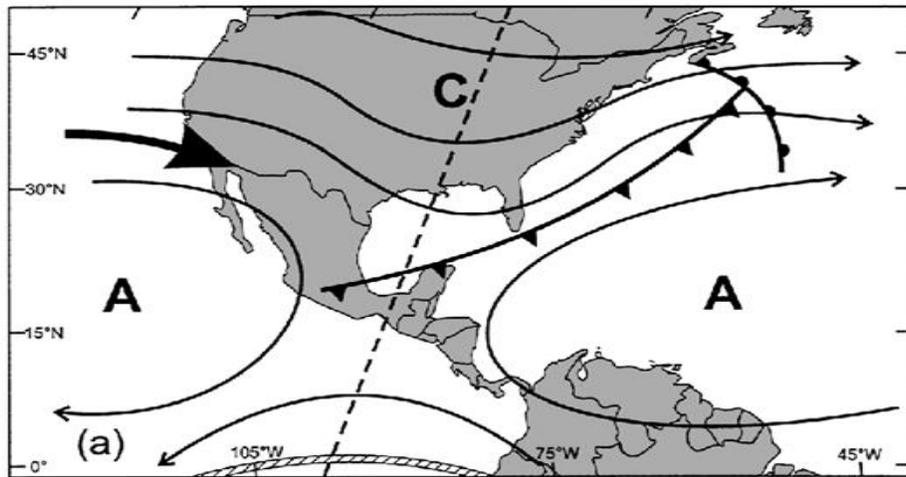


Fig. 3 Principales características de la circulación atmosférica en México para invierno (a) y verano (b). Tomado de Metcalfe et al., 2000.

## 2.2 Clima de los últimos 2000 años

Como ya se comentó en la introducción y antecedentes, en los últimos 2000 años del Holoceno, en el hemisferio norte se presentaron variaciones climáticas importantes como: la SCT (750 a 900 d.C.), la ACM (900 a 1300 d.C.) y la PEH (1350 a 1850 d.C.). Posteriormente, en tiempos recientes (últimos 150 años) ha ocurrido un calentamiento evidente, provocado por la intensificación de las actividades antropogénicas y el abuso de los recursos naturales del planeta.

### 2.2.1 Sequia del Clásico Terminal (750 a 900 d.C.)

El periodo Clásico en Mesoamérica abarca de 200 a 950 d.C. (Cohen y Crane, 2007). En este periodo surgieron y se desarrollaron importantes culturas en el centro y sur del país. La evidencia paleoclimática proveniente de diversos sitios en México ha demostrado la existencia de sequias recurrentes durante el Clásico Terminal (750 - 900 d.C.), como ya se comentó en la sección de Antecedentes, dando crédito a la noción de que el clima, y específicamente las sequías, jugaron un papel importante en el abandono durante el Clásico Terminal (Haug, 2005; Márquez y Hernández 2013).

La SCT también se ha identificado en estudios realizados en sedimentos oceánicos en la cuenca de Cariaco, Venezuela (Haug, 2003), donde se registra como disminuciones en el elemento Ti entre 800 y 1000 d.C. (Fig. 4.). En Cariaco el Ti proveniente de las rocas continentales, y su aumento/disminución se utiliza como un indicador geoquímico de la entrada de materiales derivados de la escorrentía de cuencas locales (Haug, et al. 2001). El registro de Cariaco sugiere que la SCT estuvo asociada con momentos de migración al sur en la posición de la ZCIT (Haug, 2003). Esta migración se puede explicar por la variación de la insolación durante el Holoceno, tanto directamente como a través de su efecto en las condiciones de la temperatura superficial del Pacífico tropical (Haug et a., 2001). También se ha sugerido que durante la SCT la temperatura superficial del mar (TSM) fue más fría en la zona tropical del Atlántico con una reducción del Vuelco de la Circulación Profunda del Atlántico (AMOC, por sus siglas en inglés) entre 650 d.C. y 800 d.C. lo

que se vincula con la reducción de la precipitación en Mesoamérica (Bhattacharyaa et al., 2015).

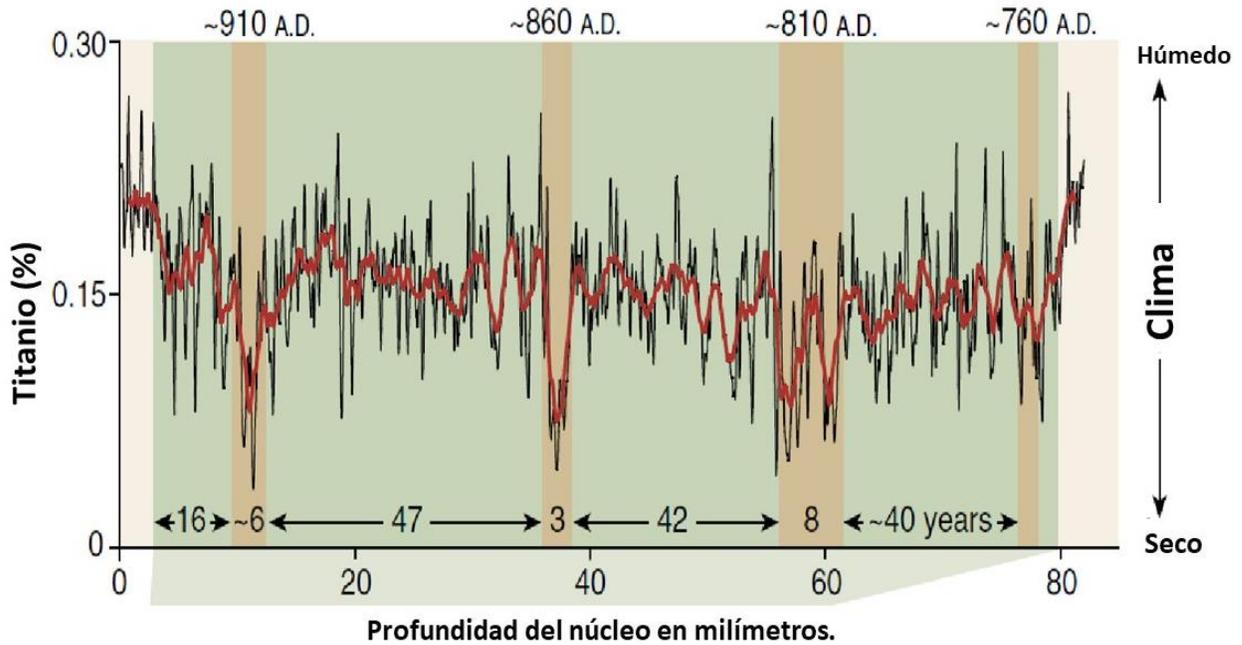


Fig.4 Registro de las variaciones del Ti, donde se observan cuatro mínimos, en distintas profundidades, que se interpretan como evidencia de sequías. El registro muestra una recurrencia de 50 años. Las condiciones secas comienzan ~760 d.C., posteriormente se registra otros periodos secos con mínimos de Ti a los 810 d.C., 860 d.C. y 910 d.C. Tomada de Haug et al., 2003.

### 2.2.2 Anomalia Climática Medieval

Se conoce como Anomalia Climática Medieval a un periodo de condiciones más cálidas en Europa que abarca del año 900 al 1300 d.C. Este periodo se adjudica a un aumento en la actividad solar (Bradley et al. 2003). Las condiciones climáticas involucraron inviernos clementes y veranos largos con una diferencia de temperatura de no más de 2°C. Estas condiciones cálidas ofrecieron ventajas para la navegación del Atlántico Norte, que los Vikingos aprovecharon para explorar los mares Nórdicos, donde había una menor cobertura de hielo marino. Así conquistaron nuevos territorios, como Islandia entre 830 y 930 d.C. (Uriarte, 2010), y Groenlandia ~ 980 d.C. Sin embargo, las evidencias de cambio climático durante la ACM no se limitan a Europa, por ejemplo, en el registro de Cariaco se ha identificado la ACM entre 1000 – 1200 d.C., (Fig.5) con una disminución en el aporte de Ti, indicando condiciones de menor escorrentía en esta región de América (Fig.5).

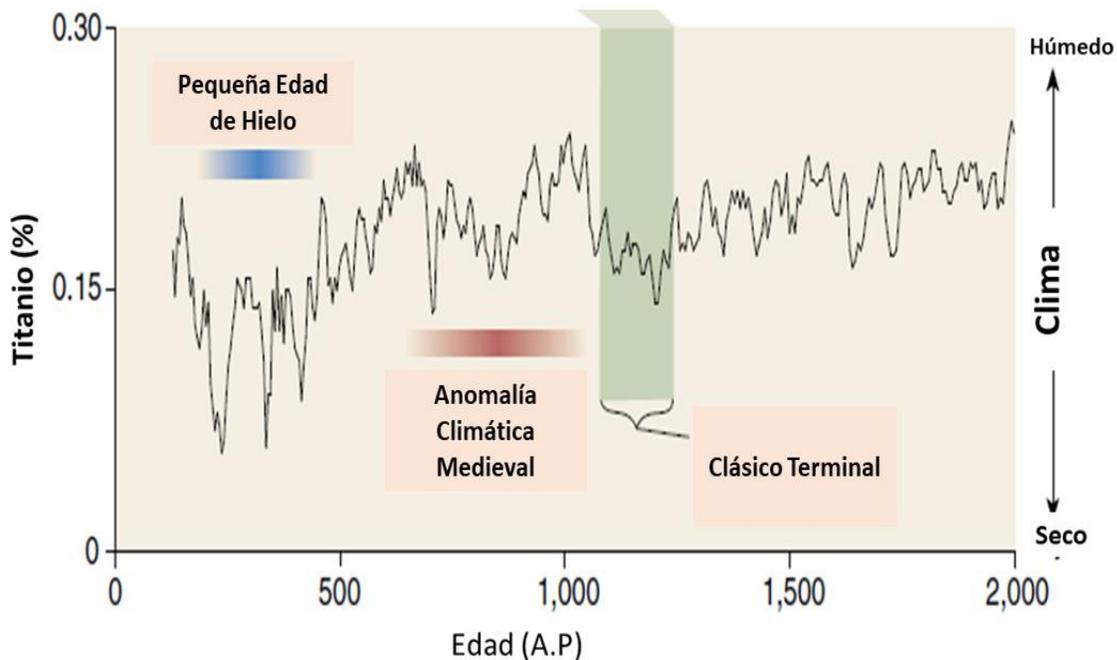


Fig. 5. Registro de Ti de la cuenca de Cariaco en el que se muestran eventos de sequía (valores bajos de Ti durante ventanas de tiempo que corresponden con el Clásico Terminal, la Anomalía Climática Medieval y la Pequeña Edad de Hielo. (Tomado de Haug, 2005).

### 2.2.3 Pequeña Edad de Hielo (PEH).

La Pequeña Edad de Hielo (PEH) abarca de 1350 a 1850 d.C., y ha sido identificada como una de las oscilaciones climáticas más importantes del Holoceno tardío y el último de varios eventos milenarios de enfriamiento centrados sobre el Atlántico Norte durante el Holoceno. El enfriamiento en latitudes tropicales durante la PEH es evidente por los avances de los glaciares de montaña en los trópicos y las temperaturas reducidas de la superficie del mar en el Caribe (Crowley, 2000; Wanner et al., 2011; Mayewski et al., 2004)

Algunos autores han identificado como una posible causa de la PEH una disminución en la actividad solar y el número de manchas solares, en particular se asocia con los mínimos de actividad solar conocidos como de Spörer (~1500) y de Maunder (1645 a 1715) (Uríarte 2010), aunque otros sugieren que la actividad volcánica fue un elemento importante que causó una reducción en la penetración

de la radiación solar, afectando el sistema océano-atmósfera (Gifford et al., 2012; Crowley, 2000; Wanner et al., 2011).

Un ejemplo de la relación entre el enfriamiento durante la PEH y la actividad solar se identificó claramente en un estudio realizado en los sedimentos de Lago Verde, Veracruz (Lozano et al. 2007), donde la PEH tuvo dos fases de enfriamiento durante los dos mencionados mínimos solares, entre 1500 – 1550 d.C. y entre 1650 -1700 d.C. Este registro también estableció un enfriamiento máximo en el invierno de 2°C durante el periodo de la PEH para el este de México. Estas estimaciones de temperatura coinciden con observaciones en la disminución de la TSM con anomalías negativas de entre 1 °C y 3 ° C en registros del Caribe y el este del Atlántico Norte (Lozano et al., 2007).

Hay diversas evidencias que sugieren que la PEH en México y el Caribe fue en general un intervalo seco. Por ejemplo, en el registro de la cuenca de Cariaco Ven., las concentraciones de Ti en los últimos 2000 años fueron las más bajas entre los años 1450 – 1750 d.C. (Haug et al., 2001) (Fig. 5), indicando condiciones secas para Mesoamérica.

Esto coincide con el registro presentado previamente (Antecedentes) del lago Santa María del Oro que también indica condiciones secas durante la PEH en el oeste de México.

### **3 Zona de estudio.**

#### **3.1 Localización geográfica del lago de Coatetelco**

El lago de Coatetelco se encuentra en el municipio de Miacatlán, Morelos, en la cuenca del río Balsas. El clima de Coatetelco de acuerdo a la clasificación de Köppen y García es de tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano (“Aw<sub>1</sub>”). Este tipo de clima se caracteriza por tener una temperatura promedio superior a 18 °C en la mayor parte del año y una estación seca pronunciada (García, 2003).

La temporada de lluvias entre mayo y octubre coincide con el verano y con el movimiento de la ZCIT hacia el norte, los ciclones tropicales tanto del Pacífico como del golfo de México y el MNA. La precipitación media anual en la zona es de 1070 mm / año (Estación 17006 El Rodeo, 1951 a 2010, Servicio Meteorológico Nacional). Los meses con la mayor precipitación son agosto y septiembre con 224 mm / año y

los meses más secos se presentan en invierno y primavera (noviembre a abril) con una precipitación mensual menor a 20 mm. La temperatura media anual es de 23.7 °C.

Los meses más cálidos son abril y mayo con una temperatura promedio de 26.8 °C y los más fríos diciembre y enero, con una temperatura promedio de 21.1°C (Fig.6).

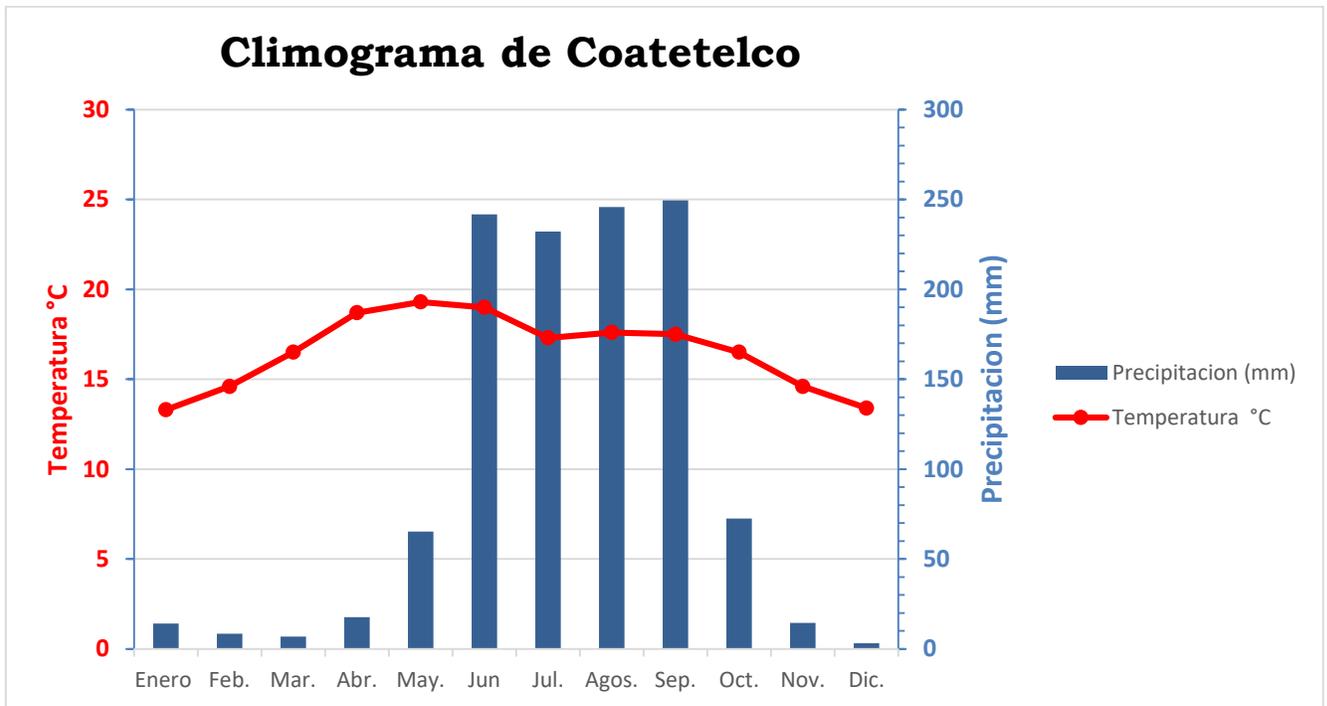


Fig. 6. Climograma de Coatetelco, Miacatlán Mor., donde se muestra la precipitación promedio mensual (mm) y la temperatura media mensual (°C). Datos tomados del Servicio Meteorológico Nacional estación 17006 El Rodeo, 1951 a 2010.

### 3.2 Lago de Coatetelco.

El lago de Coatetelco (18°45' N y 99°20' O) se ubica en la cuenca del río Balsas entre la Sierra Madre del Sur y el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), en el estado de Morelos, en el municipio de Miacatlán (Fig. 7). Tiene una superficie de 150 ha, y una altitud de 962 msnm, en las coordenadas 18 °46'07.7 Norte y 99° 20'12.3 Oeste . El lago es considerado uno de los cuerpos de agua naturales más importantes de la entidad. (Bonilla et al., 2009; Granados et al., 2014; Gómez et al., 2007; Vargas, 2017).

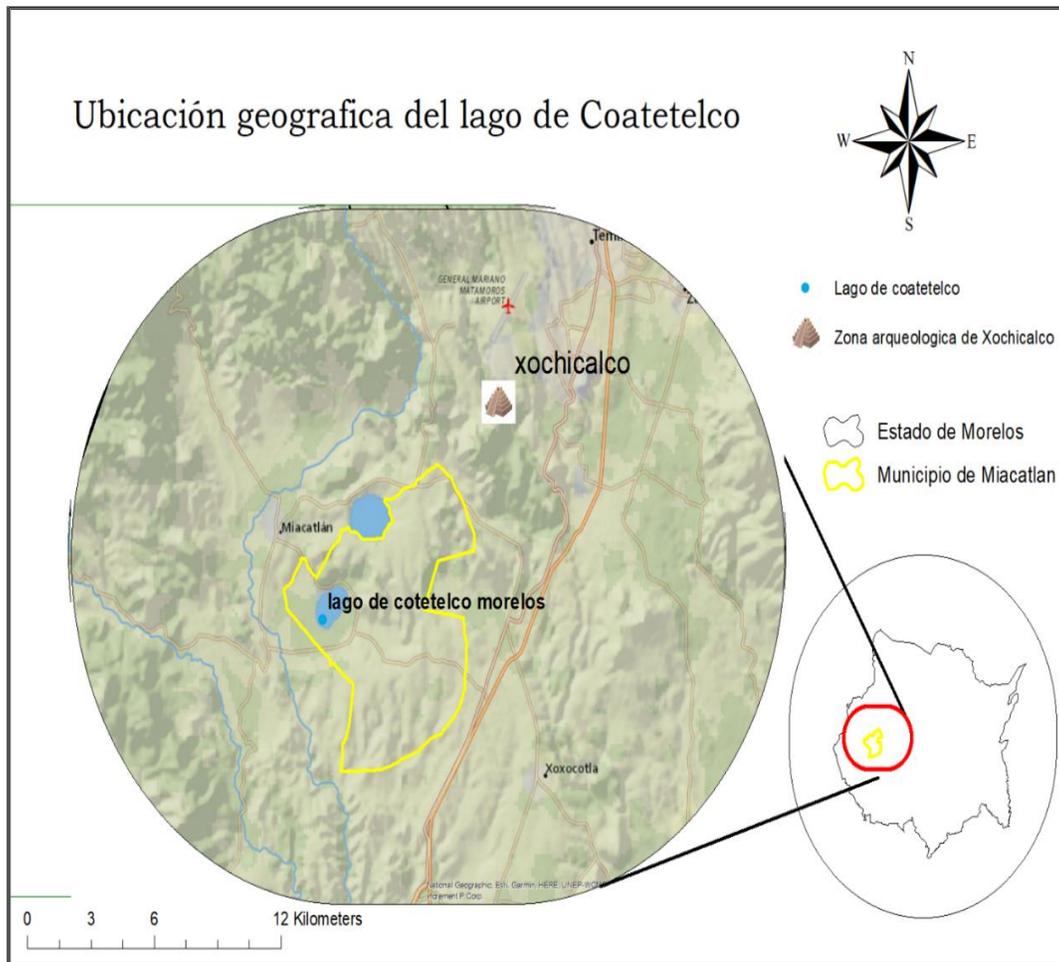


Fig. 7. Mapa de la ubicación geográfica del lago de Coatetelco, municipio de Miaquatán, Morelos, y de la zona arqueológica se Xochicalco.

Este lago ha presentado variaciones en su volumen lo que ha producido importantes problemas sociales en la región, ya que después de haber tenido 15 m de profundidad en 1930, ha disminuido a un máximo de tres metros en los últimos años debido principalmente a la extracción de agua y al aporte excesivo de sedimentos y nutrientes a consecuencia de la erosión, lo que provoca que el lago se azolve (Vargas, 2017).

La vegetación predominante de la región es bosque tropical caducifolio y vegetación secundaria (Granados Ramírez et al., 2014). Sin embargo, el lago de Coatetelco está rodeado de asentamientos humanos, principalmente restaurantes, y la mayoría del litoral está ocupada por zonas agrícolas y en menor proporción por zonas pecuarias. Lo que contribuye de manera importante con el aporte de nutrientes como fertilizantes, pesticidas y desechos de alimentos (ya sea por su

preparación y/o consumo). En conjunto ocasiona un aporte importante de nutrientes exógenos aunados a los producidos al interior del sistema por la actividad metabólica de los organismos que ahí habitan, principalmente peces bajo cultivo, pues es una actividad que se lleva a cabo en el lago desde hace varias décadas (Vargas, 2017).

El pH del lago varia en rangos alcalinos durante todo el año que oscilan de 8.5 – 9.3 con los valores más bajos durante la temporada de lluvias, debido principalmente a la dilución por el efecto de precipitaciones durante los meses de junio a noviembre (Vargas, 2017). El laboratorio de Hidrobiología de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos reportó valores de oxígeno disuelto promedio de 5.7 mg/L de, lo que se considera aceptable para la vida acuática. También reportaron una temperatura promedio de 28.3 °C (Vargas, 2017). La temperatura y el oxígeno disuelto son dos variables estrechamente relacionadas, siendo de suma importancia en procesos biológicos (respiración, fotosíntesis) que se llevan a cabo en los sistemas acuáticos. En este estudio catalogaron a Coatetelco como un lago eutrófico a hipertrófico (Fig. 9), basados en el índice de Estado Trófico de Carlson y Simpson.

En el lago de Coatetelco se realiza una actividad intensiva de acuacultura principalmente de tilapia nilotica (*Oreochromis niloticus*). El lago anualmente produce 100,000 a 200,000 crías de tilapia, lo que genera una producción aproximada por arriba de las 80 toneladas anuales. Si bien es una fuente de ingresos importante para los pobladores y una alternativa alimentaria para la población, también enriquece las aguas en nutrientes debido a que es una actividad intensiva.

### **3.3 Desarrollo histórico de la zona de estudio**

En el centro de México una de las culturas más importantes fue la cultura teotihuacana (150 a 650 d.C.). Teotihuacán se convirtió en una de las ciudades más pobladas de su época con un aproximado 250 mil habitantes, pero a mediados del Clásico fue saqueada y abandonada; aún se desconocen con exactitud las causas de su declive de acuerdo a diversos autores.

El colapso de Teotihuacán permitió que otras ciudades, como Xochicalco, tuvieran un apogeo durante el Clásico tardío (600 a 900 d.C.), pero todos estos sitios fueron también abandonados o mostraron decadencia hacia el final del Clásico (Dumond y Müller 1996)

### **3.3.1 Xochicalco**

Xochicalco es el centro arqueológico más importante del estado de Morelos, su nombre significa la casa de las Flores del Náhuatl (“Xóchitl” -flor, “calli” - casa y “co” - locativo). Se ubica en el municipio de Temixco, 38 km al sur de la capital del estado. La región presenta un relieve de serranía y lomerío que fue fundamental para los fundadores, quienes eligieron un cerro con 120 m de altura sobre el nivel del terreno (Alvarado, 2015).

Para comprender el surgimiento de Xochicalco es importante ubicarnos en el contexto espaciotemporal en el que surgió la ciudad y para ello hay que aclarar su origen. Xochicalco es un ejemplo de las ciudades que surgieron en el periodo Clásico tardío (600-900 d.C.), que para el centro de México también se conoce como Epiclásico. Este periodo se caracterizó por el surgimiento de ciudades en el centro de México tras el declive de la urbe teotihuacana y el vacío de poder que dejó. Se ha sugerido que estos eventos propiciaron en Xochicalco la llegada de varios grupos provenientes de diferentes lugares en Mesoamérica. Xochicalco es considerado el centro más importante del Epiclásico en el altiplano central de México por su magnificencia y elevado desarrollo cultural. La población de Xochicalco pudo haber excedido los 20,000 habitantes en su periodo de apogeo (Soler y Sánchez 2004).

Tras el declive de Teotihuacán, Xochicalco creció como muchas otras ciudades de la zona, para monopolizar el comercio entre la cuenca de México, Morelos, otras regiones en la costa del Pacífico, e inclusive la zona maya. Las similitudes en estilo arquitectónico y el simbolismo pictográfico con la cultura teotihuacana son muy evidentes en sus construcciones (Nichols 2000). Los habitantes que abandonaron Teotihuacán dejaron un rastro de su desplazamiento a un territorio nuevo de establecimiento que permitiera identificar o asociar su procedencia. La escritura que aparece principalmente en los elementos escultóricos, también es un ejemplo del posible origen teotihuacano, aunque algunos elementos

muestran influencia zapoteca y maya. A partir de la evidencia arquitectónica presente en Xochicalco, se puede inferir que la ciudad fue construida con la intención de dominar toda una región, y de controlar las rutas de comercio. Fue una de las más poderosas metrópolis de su tiempo.

Debido al clima subhúmedo de la zona, los recursos hídricos no eran de fácil acceso para los habitantes, por lo que el agua pudo haber estado bajo el dominio de la autoridad de Xochicalco.

Una de las fuentes de agua de más fácil acceso para los habitantes de Xochicalco es el río Tembembé que pasa por la parte occidental de la ciudad, a 200 m en vertical desde la cima (Alvarado, 2015). Otras fuentes de agua pudieron haber sido cuerpos de agua perenes como el lago de Coatetelco, ubicado 10 km hacia el sur de Xochicalco.



Fig. 8. Vista aérea de la ciudad de Xochicalco. Tomado de la página oficial del Museo de Xochicalco

La historia de la fundación de Xochicalco se divide en Cuatro etapas:

**Fundación: 600 – 700 d.C.**

En esta etapa se inició la construcción de la ciudad, con un gran aprovechamiento de las características del terreno, como ya se ha mencionado la ciudad se construyó en una ubicación estratégica de defensa en lo alto de las colinas de la zona. En esta primera etapa, se edificaron las primeras pirámides.

**Auge: 700 – 900 d.C.**

En esta etapa la ciudad tuvo un gran crecimiento económico, político, demográfico y cultural. La Pirámide de las Serpientes Emplumadas fue objeto de su tercera y última ampliación, en la que destacan sus magníficos grabados (Berlo 1989; Garza y González 1998; González et al. 1999; Smith 2000; Alvarado 2015). En esta etapa Xochicalco se consolida como una gran ciudad, con una fuerte estructura social y política, un dominio comercial, y con una gran población que sabía aprovechar los recursos con los que contaban.

**Transformación y Caída: 900 – 1100 d.C.**

En esta etapa se presenta un cambio en la estructura política y religiosa que pudo haber llevado a conflictos internos por el poder y el control de la ciudad y sus recursos, ocasionando una etapa de declive. Aunque anteriormente se consideraba que Xochicalco fue abandonado hacia el año 900 d. C., los resultados obtenidos por medio de análisis con nuevas técnicas de fechamiento absoluto, como el arqueomagnetismo (Soler y Sánchez 2004), han permitido establecer una nueva fecha de abandono en el año 1100 d.C. (González et al., 2008). Se ha sugerido como una de las causas del abandono y declive de esta ciudad fueron los conflictos internos que terminaron por incendiar la ciudad que fue abandonada abruptamente ~ 1100 d.C.

## **4 Materiales y Métodos**

### **4.1 Recuperación de la secuencia sedimentaria.**

La secuencia sedimentaria del lago de Coatetelco fue recolectada en el año 2015. Se recuperó con un equipo de perforación con tubos de aluminio y un sistema de pistón que evita que se pierda el sedimento. El equipo se operó desde una plataforma de madera armada sobre dos lanchas inflables. El diámetro de los tubos utilizados fue de 5 cm, y su longitud de aproximadamente 1 m. En total se recuperó una secuencia de 2.6 m.

### **4.2 Modelo de edad**

Se dataron tres muestras de sedimento por el método de radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) en el laboratorio Beta Analytic. Para generar un modelo de edad se utilizó la paquetería Bacon (Blaauw y Christeny, 2011), en R, que construye un modelo bayesiano, calibrando las edades de  $^{14}\text{C}$  con la base de datos Intcal13 (Reimer et al., 2004) para obtener edades calendáricas expresadas en años antes del presente (AP).

### **4.3 Procesamiento de muestras**

Cuarenta y dos muestras de sedimento lacustre, espaciadas cada 5 cm, se procesaron en el laboratorio de Paleolimnología del Instituto de Geofísica de la UNAM. Las muestras para identificar diatomeas se pesaron (0.5 g de sedimento seco) y se trataron con ácido clorhídrico diluido (HCl 10%) para eliminar carbonatos. Para la materia orgánica se utilizó peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$  30%), y se dejó reaccionar en una parrilla hasta la eliminación total de materia orgánica (Fig.9), el tiempo de reacción varió de acuerdo a la cantidad de carbonatos y materia orgánica presentes en la muestra. Posteriormente se realizaron cinco enjuagues por decantación cada 24 horas, hasta eliminar todos los restos de los reactivos utilizados. Terminado este proceso se almacenaron la muestra en botellas de plástico de 30 ml (Fig. 10).



Fig. 9 Procesamiento de las muestras para diatomeas.

#### 4.4 Análisis geoquímico.

Las concentraciones de elementos en las muestras se midieron con un analizador portátil de fluorescencia de rayos-X Nitón XL3t en el laboratorio de “Paleoecología, Paleo climatología y Cambio Climático” del instituto de Geología de la UNAM. Se midieron distintos elementos, pero para este estudio solo se consideraron el Ti y el Ca, calculando la relación Ca/Ti.

#### 4.5 Análisis al microscopio.

Para el análisis de diatomeas al microscopio se montaron laminillas permanentes. Primero se tomó un 1 ml de la muestra procesada con ayuda de una micropipeta y se hizo una dilución de 1:5 o 1:10, de acuerdo a como lo requiriera cada muestra. Posteriormente se colocaron dos cubre objetos redondos en donde se depositaron 200  $\mu$ l de la dilución correspondiente. Se aseguró que la muestra cubriera adecuadamente toda la superficie del cubreobjetos y se dejó secar. Posteriormente se montó en un portaobjetos limpio, utilizando la resina Naphrax®.

Cuando las muestras quedaron fijas se procedió a observar cada muestra en un microscopio óptico (Olympus BX50) y a identificar las especies de diatomeas presentes en las 42 muestras. Se procedió a hacer los conteos de las valvas con un aumento de 100x, haciendo de tres a cuatro transectos diametrales, contando como mínimo 100 valvas por muestra.

Las muestras en las que se obtuvieron menos de 100 valvas por muestra no fueron consideradas, ya que no son estadísticamente significativas. Posteriormente se realizó una búsqueda de gabinete de la información ecológica de cada especie para hacer la interpretación paleoclimática. Se utilizó el programa Tilia, para graficar las abundancias relativas (%) de las especies con respecto a la profundidad y la edad de la secuencia en edades calibradas antes del presente (AP) y en edades calendáricas (a.C./d.C.)

#### 4.6 Análisis de correspondencia sin tendencia (DCA)

Con la matriz de abundancias relativas se aplicó un análisis de correspondencia sin tendencia (DCA) realizado en *R* con la paquetería Vegan (Oksanen et al., 2009). El DCA es una técnica estadística que ordena las muestras en términos de su desviación estándar (Hill y Gauch, 1980, Gauch, 1982). Con el DCA se puede definir un contexto ambiental acorde con la dinámica reflejada en las asociaciones basado en un conocimiento previo de la ecología de las especies (Correa et al., 2014). El significado de los ejes del DCA se infiere evaluando la posición relativa de las especies en términos de lo que se sabe de su distribución en gradientes ambientales modernos.

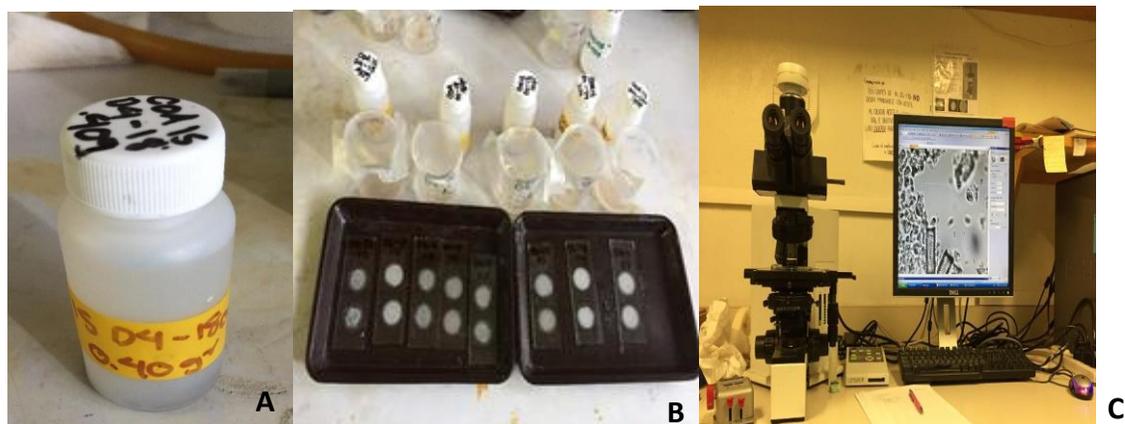


Fig. 10 A) Botella de 30 ml en las que se almacenan las muestras. B) Grupo de preparaciones en proceso de montaje. C) Microscopio *Olympus* en el que se realizaron los análisis de diatomeas.

## 4.7 Diatomeas como paleo indicadores en el lago de Coatetelco.

Las diatomeas son un grupo de organismos eucariontes unicelulares cuyo tamaño puede variar entre 10 y 200  $\mu\text{m}$  (0.01 a 0.2 mm), (Caballero y Maidana 2017). Son importantes productores primarios, ya que son organismos fotosintéticos. Es decir, utilizan la energía del Sol y fijan  $\text{CO}_2$  de la atmósfera que convierten en carbono orgánico liberando oxígeno. Una característica particular de las diatomeas es que su pared celular está impregnada de sílice, formando una estructura rígida denominada frústulo, dentro de la cual vive la célula (Caballero y Maidana 2017). El frústulo se conserva bien en los sedimentos, lo que los hace buenos bioindicadores. El frústulo se caracteriza por presentar diversos tipos de perforaciones ordenadas que siguen patrones más o menos intrincados y específicos que permiten, en general, identificar a los principales grupos taxonómicos, inclusive hasta el nivel de especie y variedad (Caballero y Maidaña 2017). Actualmente, se estima que existen entre 30,000 y 100,000 especies diferentes (Mann y Vanormelingen 2013).

El frústulo de las diatomeas está formado por dos estructuras llamadas valvas unidas por bandas de sílice que en conjunto forman al cingulo. Una de las valvas es más grande que la otra, a esta se le llama epivalva y la otra más pequeña, se le llama hipovalva (Fig. 11). En general existen dos tipos de geometría en la ornamentación de la valva, una geometría radial en el grupo denominado centrales y una geometría bilateral en el grupo denominado pennales o pennadas. Muchas de las diatomeas pennadas tienen una ranura longitudinal denominada rafe, que es una estructura que permite la movilidad de las diatomeas, permitiéndoles deslizarse sobre las superficies en las que viven, y es importante para su identificación.

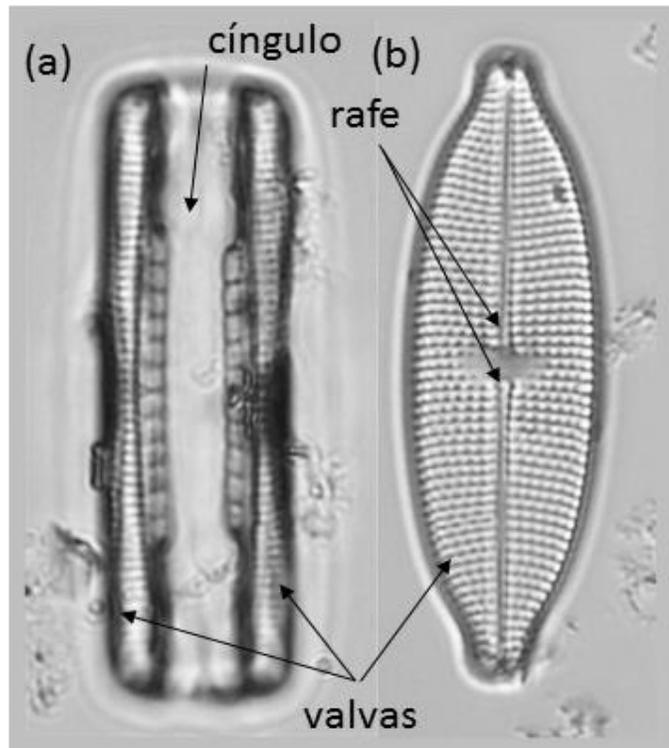


Figura 11. En esta imagen se observa la vista a) singular y b) valvar de una diatomea penada. En la vista singular se aprecian las dos valvas de la diatomea y el cíngulo y en la vista valvar se observa la estructura “rafe” a lo largo de la valva. Tomado de Caballero y Maidana 2017.

#### 4.7.1 Clasificación de las diatomeas

Los sistemas de clasificación para las diatomeas se basan principalmente en criterios morfológicos de la valva. En este trabajo se utilizó la clasificación de Medlin y Kaczarska (2004), que se basa tanto en características morfológicas que involucran la ornamentación de la valva como en datos genéticos del RNA ribosomal (Caballero y Maidana 2017). En esta clasificación las diatomeas se dividen en dos clados o subdivisiones: Coscinodiscophytina y Bacillariophytina. La subdivisión Coscinodiscophytina con sola una clase (Coscinodiscophyceae), donde se ubican las diatomeas centrales radiales. La subdivisión Bacillariophytina con dos clases, Mediophyceae que incluye a las centrales polares y las Bacillariophyceae que incluye a todas las diatomeas pennadas (Fig. 12).

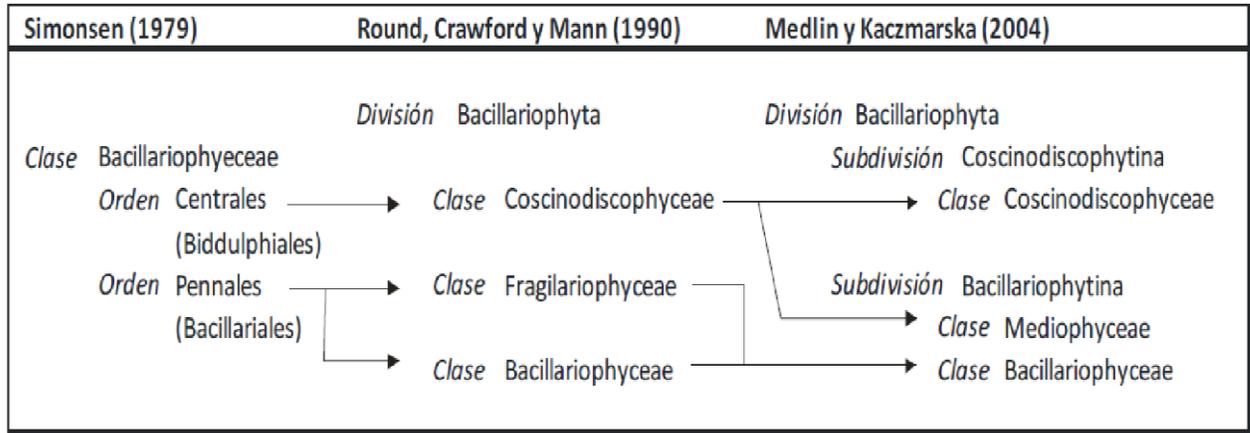


Fig. 12 (Cuadro comparativo de tres sistemas de clasificación de diatomeas: Simonsen (1979), Round et al. (1990) y Medlin y Kaczmarska (2004). Tomado de Caballero y Maidana 2017.

### 4.7.2 Ecología de las diatomeas

Las diatomeas tienen distintas formas de vida, pueden ser planctónicas, bentónicas, o aerófilas. Las diatomeas planctónicas viven en suspensión en la columna de agua, sin embargo, muchas especies planctónicas pasan parte de su ciclo de vida en los sedimentos o viven en ellos, y por resuspensión entran en la columna de agua (Caballero y Maidana 2017). El desarrollo de las poblaciones planctónicas depende principalmente de la disponibilidad de nutrientes, especialmente silicatos, en la columna de agua.

Las diatomeas bentónicas viven adheridas a un sustrato o libres, sobre o entre de los sedimentos, como los géneros *Cocconeis* y *Rhopalodia*. Existen células unidas por pedúnculos o cojines mucilaginosos como *Cymbella* o *Gomphonema*. Los individuos que viven en los sedimentos están adaptados a bajas condiciones de luz. Además, de acuerdo con el sustrato sobre el cual se encuentren pueden clasificarse en epífitas (plantas), epilíticas (rocas), epipsámmicas (arena) o epipélicas (sedimento fino). La colonización de diversos ambientes por parte de las diatomeas bentónicas depende principalmente de la disponibilidad de un sustrato adecuado y la penetración de la luz (Battarbee et al. 2001; Caballero y Maidana, 2017). Las diatomeas aerófilas viven entre las hojas de plantas, sobre rocas y suelos húmedo como *Hantzschia amphioxys*.

Las diatomeas tienen una distribución cosmopolita esto quiere decir que las podemos encontrar en una gran variedad de ambientes y son importantes componentes de los sistemas acuáticos. Se pueden encontrar tanto en ambientes marinos como continentales y también en ambientes transicionales como son los manglares o las lagunas costeras. En los ambientes continentales, existen en todo tipo de ecosistema acuático (lagos, charcos, cascadas, musgos, pantanos, humedales etc.) y pueden ser ambientes loticos y lenticos. Pueden vivir bajo condiciones extremas, desde hielos polares con temperaturas inferiores a 0° C, hasta en aguas termales con temperaturas extremas.

Su distribución está relacionada con factores tanto físicos y químicos de los cuerpos de agua como son: patrones de mezcla en la columna de agua, presencia de hielo, temperatura, cambios de pH, variaciones de salinidad, disponibilidad de sustrato, concentración de nutrientes, cambios en la profundidad, cambios en la penetración de la luz, etc. A su vez, estos factores están controlados en gran medida por el clima y la geología de la región y también se pueden ver modificados por impacto humano (Caballero y Maidana 2017; Battarbee et al. 2001; Round et al. 1990).

Las diatomeas responden rápidamente a los cambios en el ambiente y son bastante específicas a las condiciones en las que viven por lo que se consideran excelentes bioindicadores.

Además, sus frústulos silíceos no se degradan fácilmente, conservándose en los sedimentos por millones de años, lo que permite su estudio a lo largo del tiempo. Las relaciones entre las especies de diatomeas y las características de su hábitat han sido cuantificadas por diversos métodos y usadas para caracterizar ambientes acuáticos, tanto los presentes como los pasados (Battarbee et al. 2001; Round et al. 1990; Stoermer y Smol 2001).

Algunos autores consideran que las diatomeas son cosmopolitas dado su elevada abundancia y tamaño pequeño, tienen una dispersión muy eficiente (Finlay et al. 2002). Pero se considera que la distribución de las especies está más bien controlada por las condiciones fisicoquímicas del medio (pH, salinidad, nivel de nutrientes, oxígeno disuelto). Por lo que se han definido grupos ecológicos por afinidades de pH, salinidad y nutrientes (Fig.13).

Espectro de pH (Hustedt, 1937-38)		Espectro de salinidad (Lowe, 1974)	
Categoría	pH óptimo	Categoría	salinidad (mg/l)
		Polihalobias	>40,000
Acidobiontes	<5.5	Eusalobias	30,000-40,000 (marinas)
Acidofilas	?7	Mesohalobias	500 a 30,000 (salobres)
Indiferentes	7	alfa	10,000 a 30,000
Alcalifilas	?7	beta	500 a 10,000 mg/l
Alcalobiontes	>7	Oligohalobias	<500 (agua dulce)
		halofilas	prefieren presencia de sales
		indiferentes	toleran la presneia de sales
		halofobas	no toleran la presencia de sales

Fig. 13. Clasificación de diatomeas por grupos ecológicos de acuerdo al pH (Hustedt 1937- 1938) y salinidad (Lowe 1974). Tomado de Caballero y Maidana 2017.

## 5 Resultados.

### 5.1 Descripción de la secuencia y modelo de edad.

El sedimento a lo largo del núcleo mostró una estructura masiva, homogénea, con textura limo arcillosa y coloración oscura (5 Y 3/4 en la escala de Munsell). Debido a esto, no se dibuja una columna estratigráfica.

<b>Clave de laboratorio</b>	<b>Muestra</b>	<b>Años cal A.P.</b>	<b>Edad Calendárica d.C.</b>	<b>Error</b>	<b>Profundidad (cm)</b>
<b>Beta - 498460</b>	COA15IID2-16	565	1385	+/- 30	83
<b>Beta - 434894</b>	COA15IID2-43	610	1340	+/- 30	113
<b>Beta - 425945</b>	COA15IID4-42	2000	50	+/- 30	252

Cuadro 1. Dataciones de las muestras de sedimento del lago Coatetelco, Morelos.

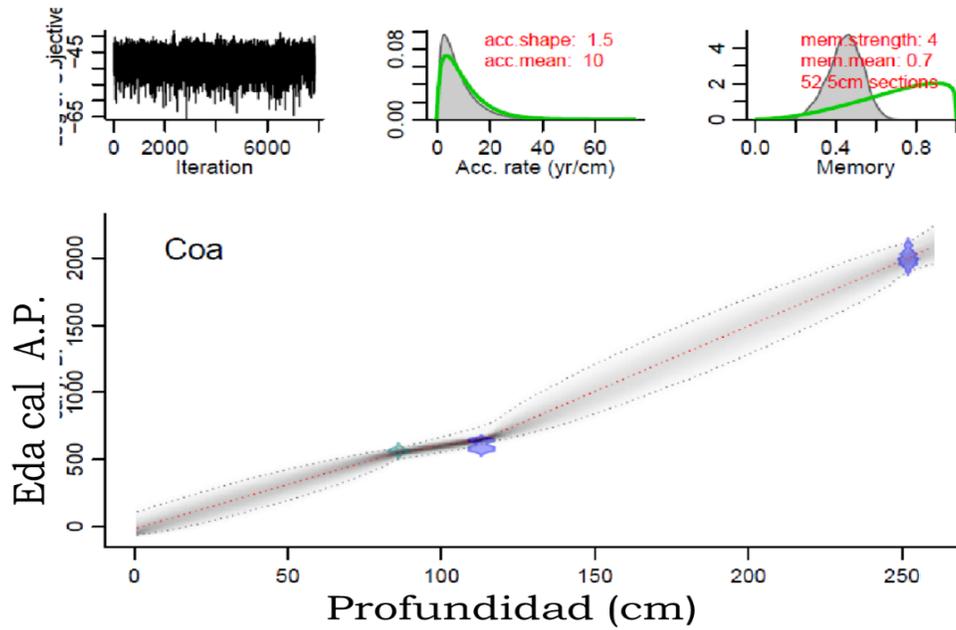


Fig. 14. Modelo de edad, se muestran las tres dataciones y el ajuste de la interpolación lineal.

De acuerdo con los fechamientos obtenidos y el modelo de edad construido (Fig. 14) la edad estimada para la base de la secuencia es de 2082 A.P (132 a.C.) mientras que la edad estimada para la cima corresponde con el año 1958 d.C.

Esto sugiere que la secuencia recuperada pudo haber perdido el sedimento superficial más joven durante las maniobras de perforación, lo cual es común en este tipo de secuencias. Se puede estimar una tasa de sedimentación promedio de 0.13 cm/año.

## 5.2 Geoquímica

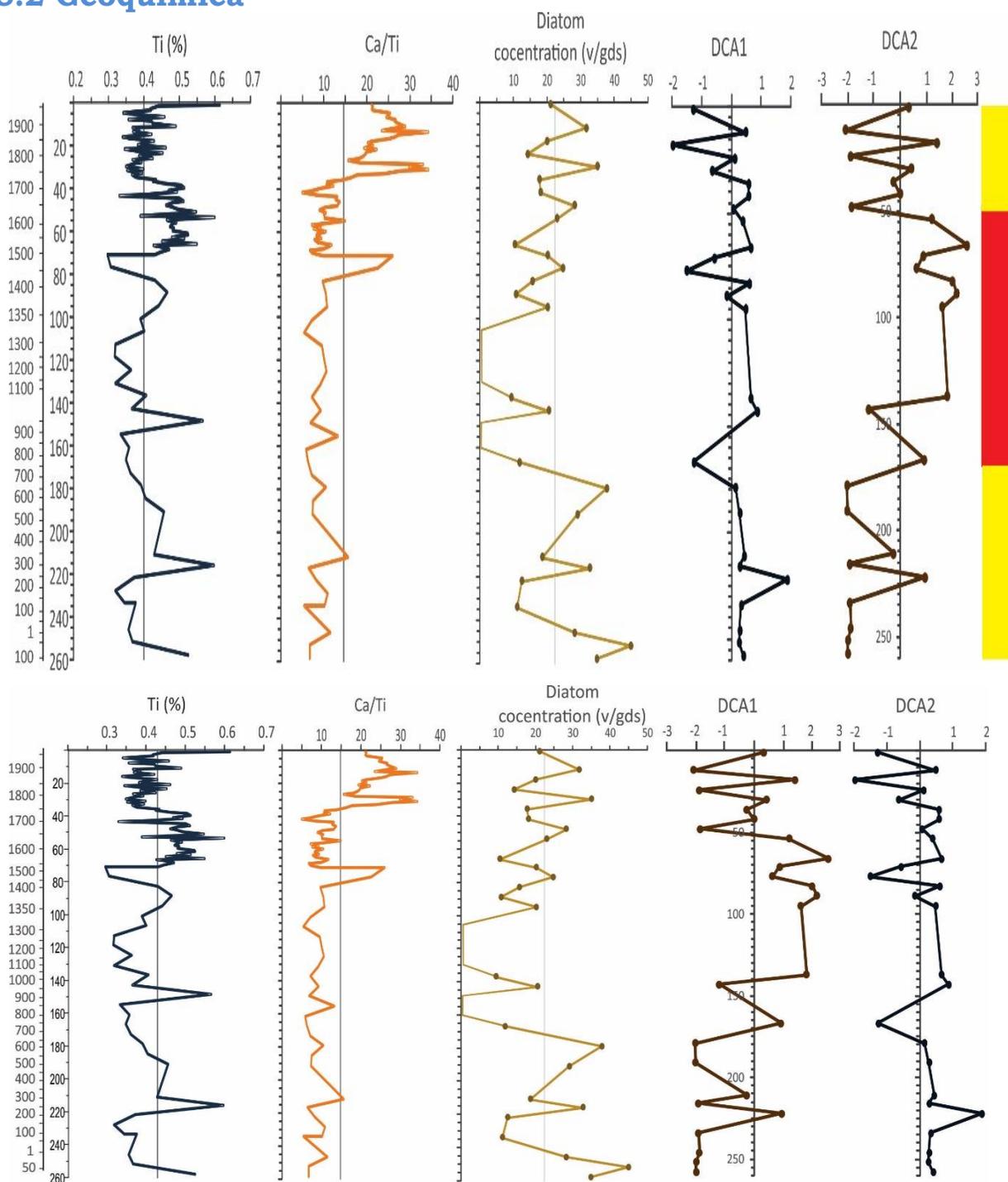


Fig.15 Grafica de los indicadores geoquímicos (Ti y Ca/Ti), concentración de diatomeas y puntuaciones de los ejes DCA1 y DCA2 vs profundidad y edad a.C./d.C., la barra de color amarillo indica la (zona I y III), la barra de color rojo (zona II).

Los datos de Ca/Ti y Ti se presentan en la Fig. 15. El Ca/Ti osciló entre 5 y 34, con un valor promedio de 15. Valores superiores al promedio de Ca/ti estuvieron presentes a los 211 cm (350 a.C.), entre 83 y 70 cm (1420 a 1500 d.C.), un incremento considerable entre 40 a 30 cm (1700 a 1770 d.C.) y un último incremento a los 15 cm (1870 d.C.). Por su parte, el Ti osciló entre 0.3 y 0.6%, con un promedio de 0.4%. Valores por arriba del promedio estuvieron presentes entre 220 a 190 cm (260 a.C. a 550 d.C.), a los 150 cm (950 d.C.) y entre 100 a 80 cm (1350 a 1440 d.C.), y de 60 a 40 cm (1570 a 1700 d.C.). Los valores por debajo de lo promedio se registraron entre 240 a 230 cm (80 d.C. a 170 d.C.), 180 a 155 cm (650 d.C. a 890 d.C.), de 140 a 100 cm (1040 d.C. a 1350 d.C.) y valores particularmente bajos entre 80 a 70 cm (1440 - 1500 d.C.).

## 5.3 Resultados del análisis de diatomeas

### 5.3.1 Taxonomía y distribución estratigráfica

Como resultados de los conteos se identificaron 28 especies distribuidas en 19 géneros de diatomeas. El género con más especies presentes fue *Gomphonema* que presentó cuatro especies; *G. affine*, *G. gracile*, *G. mexicanum* y *G. angustatum*. El segundo género es *Nitzschia* con tres especies *N. amphibia*, *N. compressa* y *N. amphibioides*. Los géneros *Aulacoseira*, *Luticula*, *Rhopalodia* y *Surirella* presentaron dos especies cada uno. El resto de los géneros presentaron solo una especie. Los taxa con mayor abundancia en el registro (Fig. 21) fueron 3 especies y una variedad: *Aulacoseira granulata*, *A. granulata* var. *angustissima*, *Fragilaria capucina*, y *Nitzschia amphibia*.

La concentración de diatomeas a lo largo del registro fue en general baja, oscilando entre 9.5 y 44 v/gss, con un promedio de 22.4 v/gss,(Fig. 16), con los valores más altos a los 252 y a los 179 cm. Por otro lado, concentraciones bajas y con mala preservación de las valvas (fragmentadas y con signos de redisolución) fueron comunes en la sección entre los 165 y 95 cm. La abundancia relativa de todas las especies a lo largo de la secuencia se ilustra en la figura 16, y a continuación se presentan algunos datos morfométricos y comentarios sobre la ecología de las especies más importantes del registro.

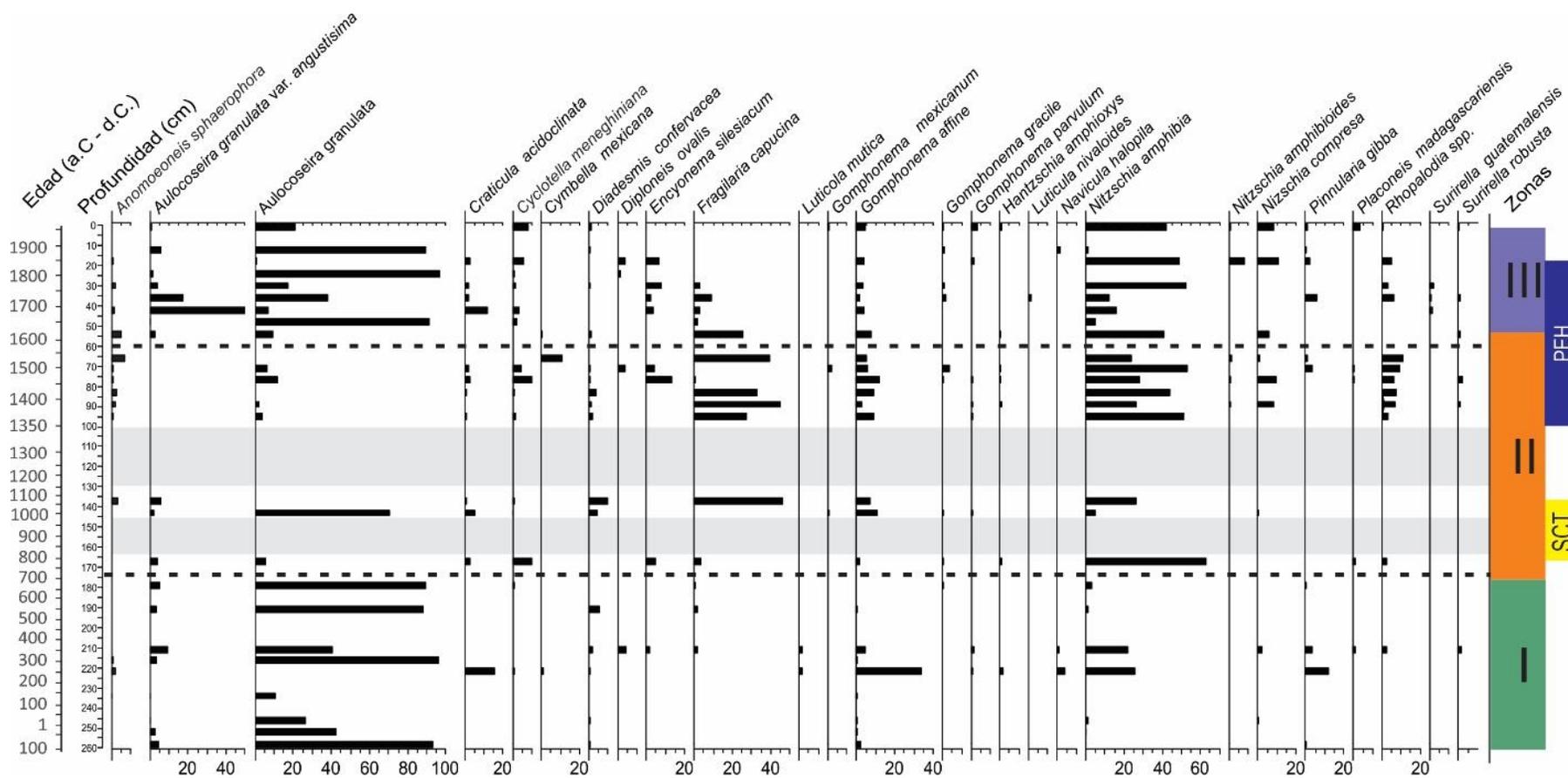


Fig. 16. En esta gráfica se muestran las abundancias de diatomeas en porcentajes. De lado izquierdo se muestra el eje de edad en a.C./d.C. y el eje de profundidad en cm. SCT = Sequías del Clásico Terminal (840 – 940 d.C.) y PEH = Pequeña Edad de Hielo (1350 - 1770 d.C.)

***Anomoeoneis sphaerophora*** Pfitzer 1871

(lámina 2:Q)

Largo: 25 – 200  $\mu\text{m}$

Ancho: 12 – 60  $\mu\text{m}$

Estrías.: 13 a 20 / 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Se reporta en ambientes como pantanos y lagos poco profundos pero rara vez se encuentra en gran abundancia. Es característica de aguas que suelen tener un pH alcalino y niveles elevados de sólidos disueltos y suspendidos, a menudo se encuentra en aguas continentales con alta salinidad (Flores et al., 2015).

***Alaucoseira granulata*** (Ehrenberg) Simonsen 1979

(lámina 1:B)

Diámetro: 4 – 30  $\mu\text{m}$

Alto del manto: 4 – 24  $\mu\text{m}$

Estrías: 7 a 15(18) / 10  $\mu\text{m}$

Manto/diámetro: 0.8 – 5  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Es una especie ampliamente distribuida en aguas epicontinentales, es considerada una especie planctónica o meroplanctónica, y está asociada con la mezcla de la columna de agua. Se asocia con lagos eutróficos y alcalinos, y es tolerante a aguas con alta turbidez. En los lagos del centro de México presenta sus mayores abundancias (> 20%), en aguas dulces a subsalinas (SDT entre 100 – 1000 mg/ L), alcalinas a muy alcalinas (pH 7 – 9) (Ramírez Nava y Caballero, 2019).

***Alaucoseira granulata var. angustisima*** (O.Müller) Simonsen 1979 (Lámina 1:A)

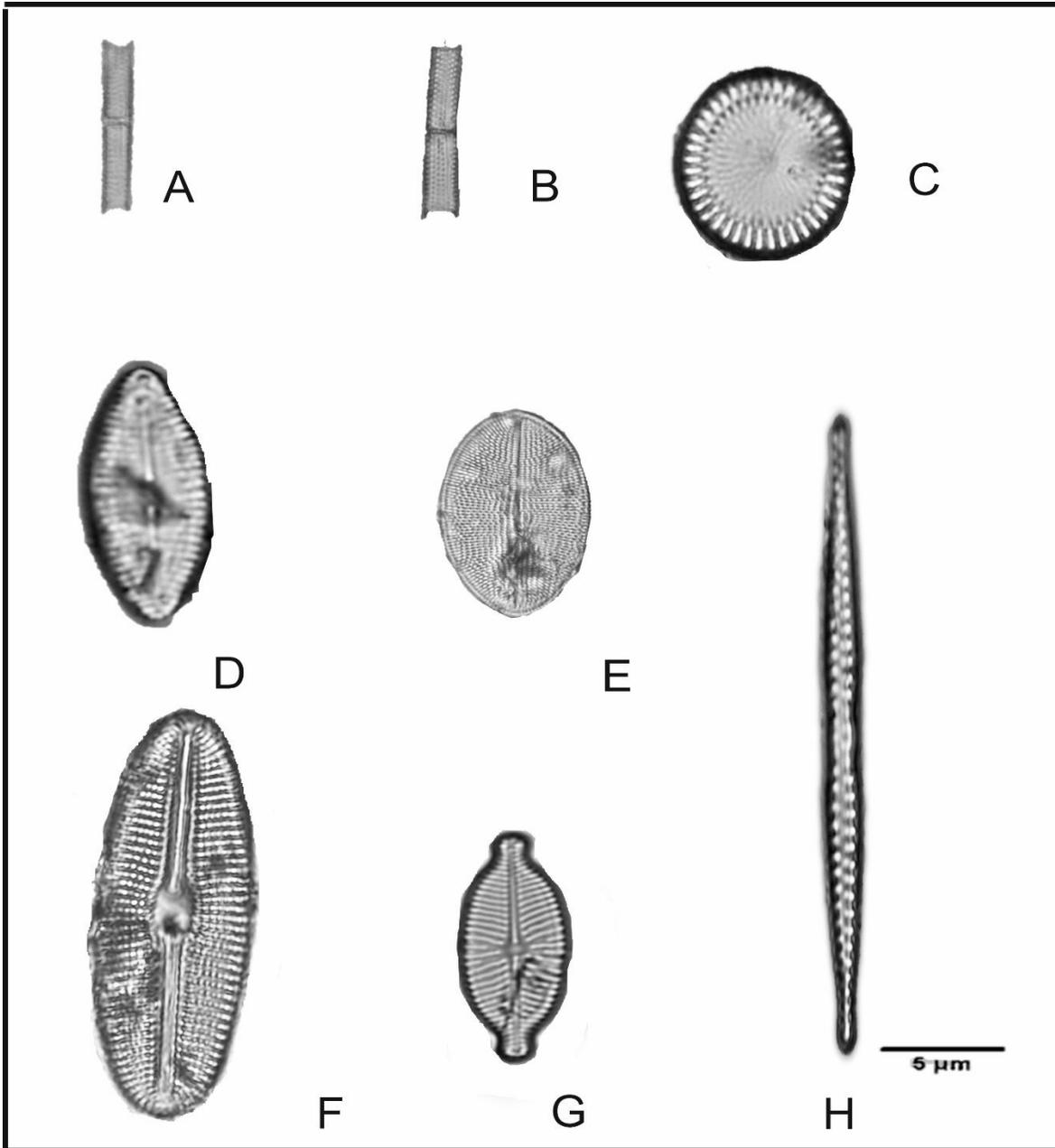
Diámetro: 2.5 – 4  $\mu\text{m}$

Alto del manto: 8 – 20  $\mu\text{m}$

Estrías: 10 a 20 / 10  $\mu\text{m}$

Manto/diámetro: > 3.2  $\mu\text{m}$

**Ecología:** En los lagos del centro de México su mayor abundancia se encuentra en aguas dulces (SDT entre 100 – 500 mg /L), levemente alcalinas (pH 7 – 8) y eutróficas a hipertróficas. Se distribuye preferencialmente en aguas menos salobres y alcalinas que la variedad nominal, pero en ambientes más someros y turbios (Ramírez Nava y Caballero 2019).



A) *Aulocoseira granula* var. *angustissima*, B) *Aulocoseira granulata*, C) *Cyclotella meneghiniana*, D) *Diadesmis confervaceae*, E) *Cocconeis placentula*, F) *Diploneis ovalis*, G) *Placoneis madagascariense*, H) *Fragilaria capucina*

Lamina 1

***Cyclotella meneghiniana*** Kützing 1844

(Lámina 1:C)

Diámetro: 12 – 40  $\mu\text{m}$

Estrías: 7 – 8 estrías por circunferencia/ 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Es una especie que se encuentra ampliamente distribuida y es particularmente común en aguas poco profundas, ricas en nutrientes. Su distribución es cosmopolita y en el centro de México se reporta en charcos, estanques, humedales, lagos, manantiales, presas y ríos (Flores et al., 2015). Se registra en temperaturas de 13 a 25 ° C. Se clasifica como una especie oligohalobia (de agua dulce) (Simon et al., 2010). En los lagos del centro de México alcanza sus mayores abundancias en aguas muy alcalinas (pH > 8), subsalinas a hiposalinas (Avendaño y Caballero 2020)

***Cymbella mexicana*** (Ehrenberg) Cleve 1894

(Lámina 5:Z)

Largo: 88 – 150  $\mu\text{m}$

Ancho: 26 – 33  $\mu\text{m}$

Estrías: 8 a 10 / 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Se reporta en aguas poco profundas, con un pH neutro. Se ha encontrado en lagos poco profundos de EUA (Patrick y Reimer 1975). Tiene una distribución tropical con registros en zonas templadas. En México se reporta en canales, charcos, humedales, y manantiales (Flores et al., 2015).

***Diadesmis confervaceae*** Kützing 1844

(Lámina 1:D)

Longitud: 12 – 18  $\mu\text{m}$

Ancho: 6 – 8  $\mu\text{m}$

Estrías: 14 – 21/ 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Vive en cadenas de células, en aguas lenticas (Lange-Bertalot et. al, 2011: Sarthou 2005 ). Domina principalmente los ambientes bentónicos. Su distribución es cosmopolita en medios alcalófilos (Flores et al., 20115).

***Encyonema silesiacum*** (Bleish ) D.G. Mann 1990

(Lámina 4:W)

**Ecología:** Se ha reportado en lagos principalmente de agua dulce. El género es particular de aguas tranquilas y poco profundas. (Mann 1999).

***Fragilaria capucina*** Desmazières 1830

(Lámina 1:H)

Largo: 10 – 44  $\mu\text{m}$

Ancho: 2 – 6.5  $\mu\text{m}$

Estrías: 12 – 17 / 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Es una especie planctónica que vive en ambientes de alto contenido de fósforo (Caballero et al., 2006). Se reporta como una especie de aguas continentales y de agua dulce. Para el centro de México se reporta principalmente en lagos someros.

***Gomphonema affine*** Kützing 1844

(Lámina 6: 1-4)

Largo: 36 – 88  $\mu\text{m}$

Ancho: 9 – 13.6  $\mu\text{m}$

Estrías: 8 a 12 / 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Es una especie de agua dulce. Tiene una distribución cosmopolita, se reporta en arroyos, canales, cascadas, charcos, estanques, estanques de peces, humedales, lagos y marismas, su principal forma de vida es bentónica, (Flores et al., 2015). Por lo que es una especie que vive en ambientes poco profundos.

***Hantzschia amphioxys*** (Ehrenberg) Grunow 1880

(Lámina 4:X)

Largo: 20 – 210  $\mu\text{m}$

Ancho: 5 – 25  $\mu\text{m}$

Estrías: 11 a 28 / 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Se reporta como una especie aerófila (Caballero y Maidana 2017), en aguas poco profundas como canales, charcos, musgos, ríos y suelos húmedos. Su forma de vida es principalmente bentónica (Flores et al., 2015).

***Nitzschia amphibia*** (Grunow) 1862

(Lámina 2:I)

Largo: 6 – 50  $\mu\text{m}$

Ancho: 6 – 9  $\mu\text{m}$

Estrías: 13 a 18 / 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Se ha reportado en aguas con temperatura de 22 °C (López et al., 2016), es característica de ambientes de poca profundidad y ambientes altamente tróficos (Caballero et al., 2006). Se reporta en ambientes someros como pantanos y charcos (Flores et al., 2015), una de sus formas de vida es bentónica.

***Nitzschia amphibioides*** Hustedt 1942

(Lámina 2:J)

Largo: 9.5 – 22  $\mu\text{m}$

Ancho: 4 - 5.2  $\mu\text{m}$

Estrías: 11 a 14 / 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Vive en aguas cálidas de aproximadamente 24°C y es una especie principalmente de aguas dulces, se reporta en aguas con un  $\text{pH} \leq 7$ . (Mann 1999).

***Nitzschia compressa*** (Bailey) C.S Boyer 1916

(Lámina2:K)

Largo: 10 – 130  $\mu\text{m}$

Ancho: 3.5 – 16  $\mu\text{m}$

Estrías: 5 a 21 / 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Es una especie que se reporta en aguas dulces, con un  $\text{pH} \geq 7$ . (Simon et al., 2010). En México se reporta como una especie de ambientes bentónicos.

***Pinularia gibba*** (Ehrenberg) Kützing 1843

(Lámina 2:L)

Largo: 50 – 140  $\mu\text{m}$

Ancho: 7 – 13  $\mu\text{m}$

Estrías: 9 a 12 / 10  $\mu\text{m}$

**Ecología:** Tiene una distribución cosmopolita, su principal forma de vida es bentónica. Se reporta en ambientes como arroyos, canales, cenotes, charcos, humedales, manantiales y ríos (Flores et al., 2015). Por lo que es una especie de ambientes poco profundos.

***Rhopalodia gibberula*** (Ehrenberg) O. Muller 1895

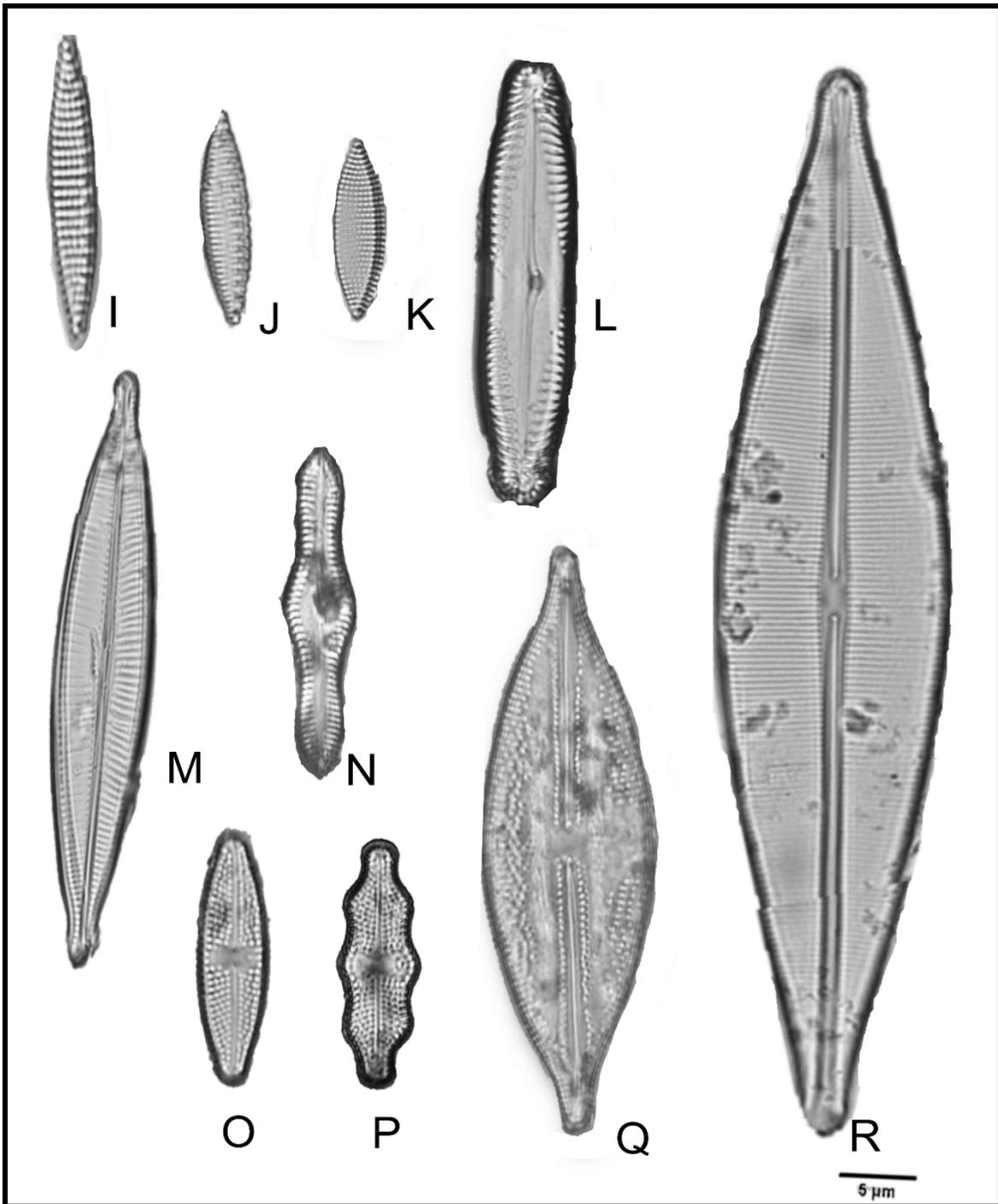
(Lámina 4:Y)

Largo: 25 – 100  $\mu\text{m}$

Ancho: 15 – 40  $\mu\text{m}$

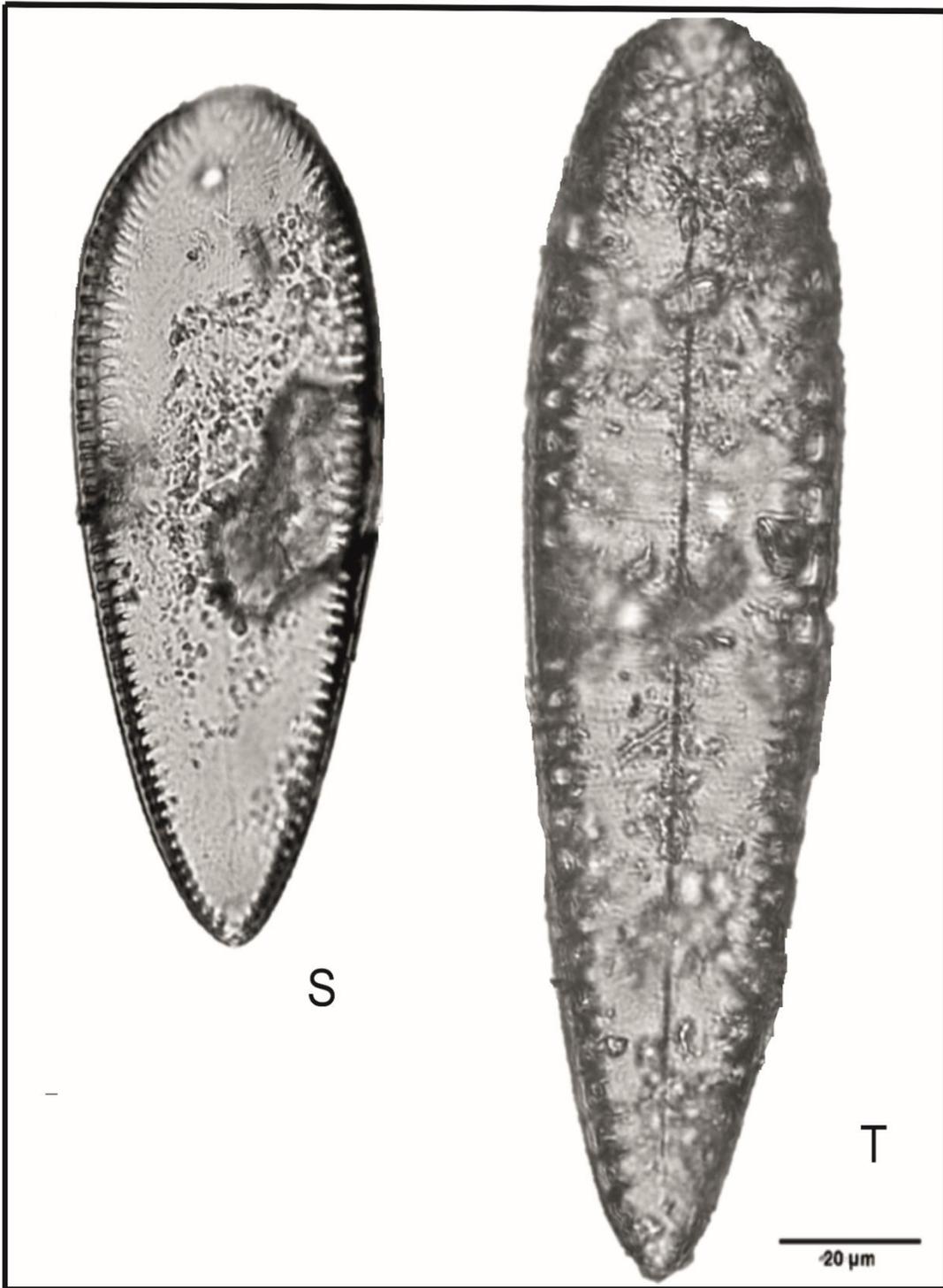
Estrías: 15 a 19 / 10 $\mu\text{m}$

**Ecología:** Se ha reportado en aguas con temperatura de un rango de 22 – 30 °C, (López et al., 2016). Tiene una distribución cosmopolita principalmente en ambientes alcalífilos. Se reporta en canales, charcos, musgos, lagos, manantiales, y ríos (Flores et al., 2015). Por lo que es una especie que vive en ambientes someros.



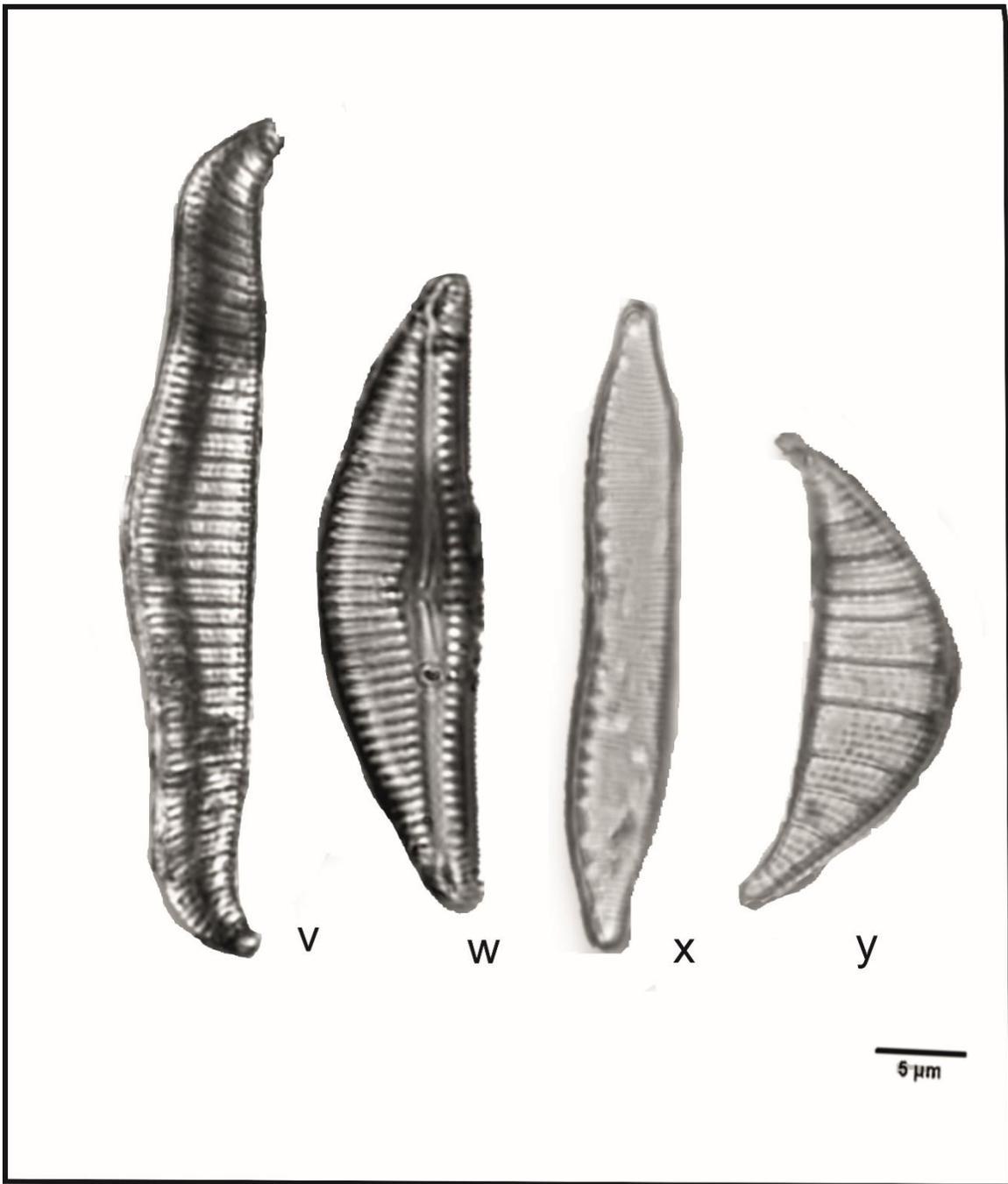
I) *Nitzschia amphibia*, j) *Nitzschia amphinioides*, K) *Nitzschia compressa*, L) *Pinnularia gibba*, M) *Navicula halopila*, N) *Caloneis biconstricta*, O) *Luticula mutica*, P) *Luticula nivaloides*, Q) *Anomoeoneis sphaerophora*, R) *Craticula acidoclinata*

Lamina 2

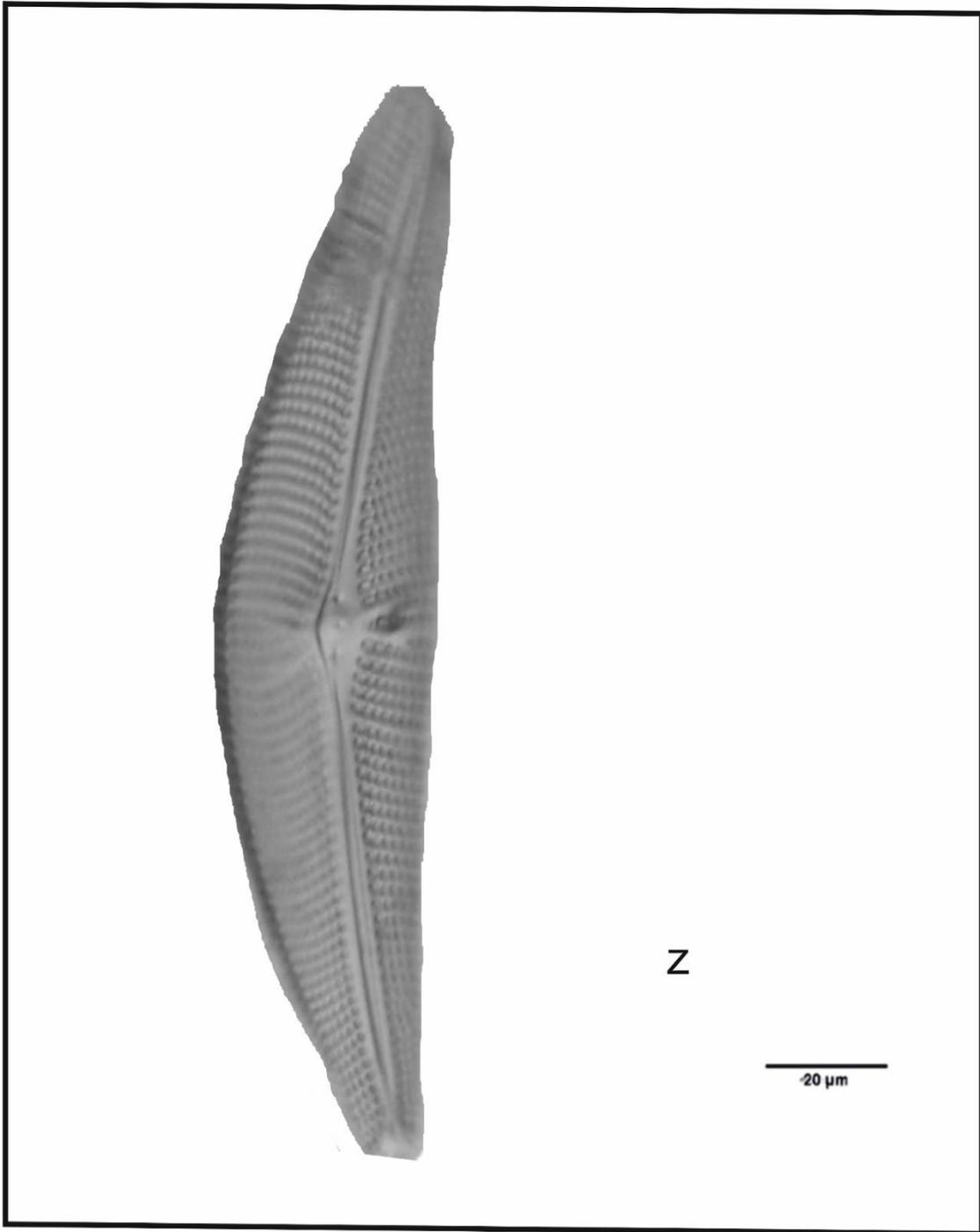


S)*Surirella guatemalensis* ,T)*Surirella robusta*

Lamina 3

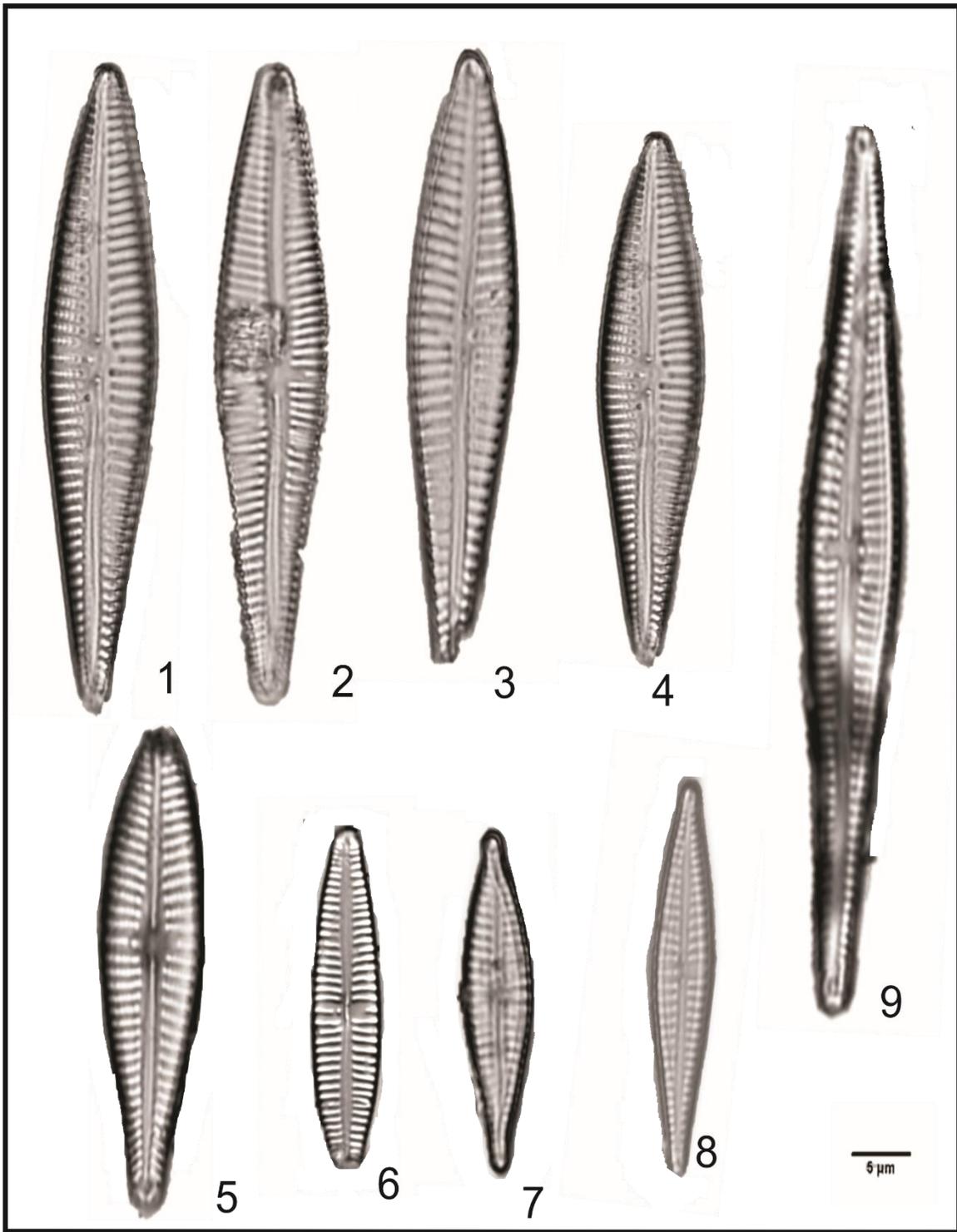


V) *Rhopalodia gibba*, W) *Encyonema silesiacum*, X) *Hantzschia amphioxys*,  
Y) *Rhopalodia gibberula*



Z) *Cymbella mexicana*

Lamina 5



1- 4) *Gomphonema affine* , 5) *Gomphonema mexicanum*, 6) *Gomphonema angustatum*,  
7- 8 ) *Gomphonema parvulum*, 9) *Gomphonema gracile*

### 5.3.2 Resultados del DCA

Se aplicó esta técnica estadística para identificar grupos de especies que ocurren simultáneamente en las muestras y posteriormente asignar una relación ecológica de estos grupos con respecto al cambio en los ejes del DCA interpretados como variables ecológicas. Como se detallará más adelante, en este caso el eje DCA1 se interpretó como cambios en profundidad y el eje DCA2 fue asociado como cambios en la salinidad del lago.

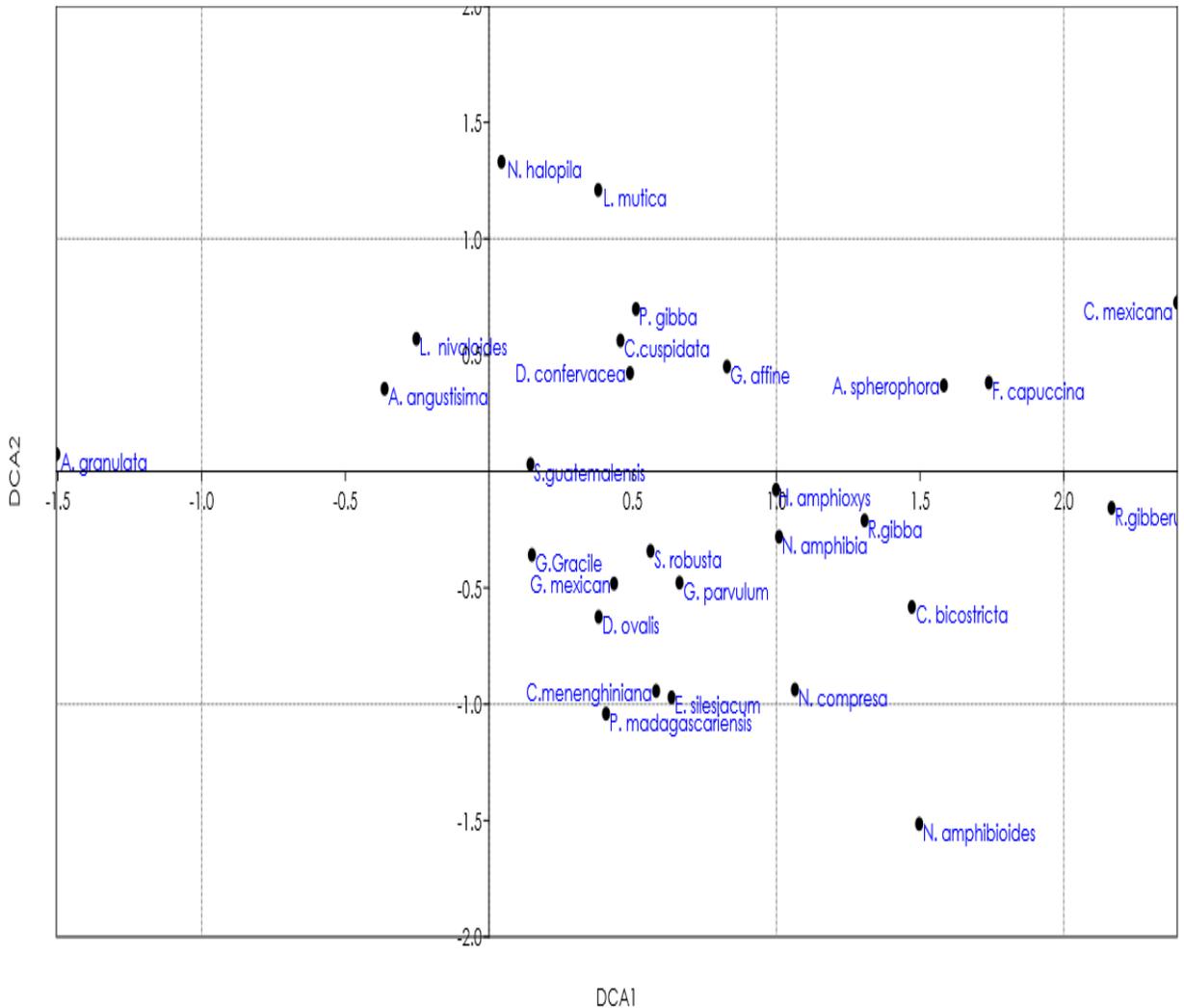


Fig. 17 Resultados del DCA donde se observa la distribución de especies de acuerdo a la profundidad (DCA1) y cambios de salinidad (DCA2).

En el diagrama del DCA1 vs. DCA2 (Fig. 17) se puede identificar a la especie *Aulacoseira granulata*, en la parte más negativa del eje DCA1, esta especie planctónica está asociada con la mezcla en la columna de agua y vive en aguas de baja sanidad, profundas (Correa et al., 2014). Es una de las especies dominantes en el registro de Coatetelco sobre todo en las profundidades entre la base de la secuencia y los 140 cm y en los 50 cm superiores (Fig. 16). Del lado negativo del DCA1 solo se encuentran otras dos especies *A. granulata* var. *angustissima* y *Luticola nivaloides* (Fig. 17). La primera de ellas tiene abundancias menores que *A. granulata*, pero una distribución a lo largo del núcleo similar, sus mayores abundancias las presenta en los primeros 50 cm de la secuencia.

Por otro lado, en la parte positiva del DCA1 se ubican las otras dos especies más abundantes a lo largo de la secuencia de Coatetelco: *Fragilaria capucina* y *Nitzschia amphibia* (Fig. 17). La primera de ellas tiene una distribución bastante característica en la secuencia, con sus abundancias más altas entre los 140 y 40 cm (Fig. 16), formando una asociación con otras especies cercanas en el DCA1 como son *Nitzschia amphibia*, *Anomoeoneis sphaerophora* y *Rhopalodia gibberlua*. Por su parte, *N. amphibia* está presente en casi toda la secuencia, pero sus mayores abundancias se concentran en la parte superior de la secuencia (140 a 0 cm). Además de *F. capuchina* y *N. amphibia*, del lado positivo del DCA1, se encuentran la mayoría de especies de diatomeas en la secuencia, muchas de ellas indicadores de aguas poco profundas o someras con una forma de vida bentónica, como *Hantzschia ampioxys*, *Rhopalodia gibberula* y *Rhopalodia gibba*, *Gomphonema affine*, *Gomphonema gracile*, *Gomphonema mexicana*, *Encyonmea sileciacum* (Fig. 17). Estas especies se presentan en abundancias relativamente bajas, pero forman un conjunto de especies o asociación con *F. capucina* y *N. amphibia* que sugieren ambientes de aguas relativamente someros en comparación con la asociación definida en el lado negativo del DCA1 (Fig. 17) que está dominada por *Aulacoseira granulata* y su variedad *A. granulata* var. *angustissima* (Caballero et al., 2006).

En vista de esta distribución de especies a lo largo del eje DCA1, se puede interpretar que este eje brinda información de la variación de la profundidad en la columna de agua, con los valores más positivos indicando ambientes más someros, mientras los valores negativos indican condiciones más profundas. Por la presencia

de *A. granulata* del lado negativo y la dominancia de *N. amphibia* y *F. capucina* del lado positivo (Fig.17).

Algunas de las especies presentes del lado positivo del DCA1 también son especies tolerantes a la salinidad como *Anomoeoneis sphaerophora*, *Carticula cuspidada* o *N. halophila*. Estas especies se denominan halófilas, y tienden a agruparse en el cuadrante superior derecho del diagrama por lo que se puede interpretar que el DCA 2 se asocia con los cambios en la salinidad (Fig. 17). Por lo tanto, las especies que toleran ya sea cambios bruscos en la salinidad y/o niveles más elevados de esta variable se encuentran en la parte superior positiva del DCA2. Por otro lado, las especies de aguas que viven en ambientes menos salobres como *Cyclotella meneghineana*, o *Nitzschia amphibioides*, se posicionan en la parte negativa del DCA2, en el cuadrante inferior derecho (Fig. 17). Por lo tanto, el DCA2 nos da información de la variación en la tolerancia a la salinidad de las especies, siendo los valores positivos donde se encuentran las especies que viven en ambientes más salobres y los valores negativos donde se encuentran las especies de aguas dulces (Fig.17). En términos de diatomeas, el espacio ecológico parece ser claramente dividido y también proporcionando evidencia adicional de la utilidad del DCA para interpretar señales ecológicas y ambientales de secuencias sedimentarias lacustres (Correa et al., 2014).

Dada la clara asociación de los ejes del DCA con el espacio ecológico reflejado por las asociaciones de diatomeas, es posible dibujar estratigráficamente los puntajes de los ejes para proporcionar una imagen simplificada de los cambios ambientales a través del tiempo (Correa, et al. 2014). Estos permiten identificar tres zonas que se definieron en base a los cambios de los valores del DCA1 Y DCA2 con respecto a la profundidad y salinidad. Por lo tanto, el DCA permite definir tres conjuntos principales de diatomeas a lo largo de la secuencia y tres zonas estratigráficas en el núcleo.

## 5.4 Descripción de las zonas de la secuencia

### 5.4.1 Zona I.

La Zona I esta es la parte inferior del núcleo que abarca de 258 a 170 cm (130 a.C. a 750 d.C.), (Fig. 16). En esta grafica se observa una alta abundancia de *Aulocoseira granulata* de hasta 95 % en algunas muestras, pero con oscilaciones como se puede observar en la Fig. 16. A los 222 cm que corresponde a 240 d.C., aparecen otras especies como *Nitzschia amphibia*, *Diploneis ovalis*, *Craticula cuspidata*, *Gomphonema affine* y *Pinularia gibba* pero *Aulocoseira granulata* disminuye drásticamente. Nuevamente de 215 a 180 cm *Aulocoseira granulata* domina con una gran abundancia (Fig.16).

En resumen, en esta zona está presente un conjunto de diatomeas dominado por *A. granulata* en asociación con abundancias variables de *N. amphibia*, *G. affine* y *A. granulata* var. *angustissima*. Este es un conjunto que representa aguas relativamente profundas y es similar al conjunto que vive en el lago hoy en día.

Los valores de DCA1 son , negativos , indicando una columna profunda de agua . Excepto por una muestra que denota un evento de aguas más someras hacia alrededor de 200 d.C., aquí vemos que también se reducen las abundancias de *A. granulata* en el registro (Fig.18). Los valores del DCA2 son positivos pero bajos, indicando que se trata de un periodo de baja salinidad, excepto durante el evento más somero alrededor de 200 d.C. donde los valores del DCA2 tienen un máximo positivo, indicando que la salinidad se incrementa, lo que concuerda con el evento de aguas más someras alrededor del 200 d.C. (Fig. 15).

### 5.3.2. Zona II

La Zona II es la parte intermedia del núcleo de 170 a 50 cm (750 – 1640 d.C.) A los 167 cm, *Aulocoseira granulata* disminuye drásticamente, y a partir de esta profundidad hasta los 142 cm no hay presencia de diatomeas.

A los 137 disminuye nuevamente *Aulocoseira granulata*, aumenta *Nitzschia amphibia*, también aumenta drásticamente *Fragilaria capuccina*, y aparecen *Diadesmis confervaceae* y *Gomphonema affine* (Fig. 16).

Posteriormente, entre los 136 a 96 cm (1080 1360 d.C.) la concentración de diatomeas es muy baja, por lo que los conteos fueron menores a 100 valvas por

muestra y estadísticamente no son significativos. En estas muestras las especies presentes fueron principalmente *Anomoeoneis sphaerophora*, *Gomphonema affine* y *Nitzschia amphibia*.

Entre 95 a 55 cm (1360 a 1600 d.C.) *A. granulata* tiene baja abundancia. En cambio, son abundantes *Nitzschia amphibia*, *Fragilaria capucina*, *Gomphonema affine* y *Rhopalodia gibberula* (Fig. 16). En resumen, esta zona incluye una parte del núcleo en la que la concentración y preservación de diatomeas es pobre.

En general, en la Zona II está presente un conjunto de diatomeas dominado por una asociación de *N. amphibia* y *F. capucina* con abundancias menores de *Rhopalodia gibberula*, *Gomphonema affine*, *Anomoeoneis sphaerophora* y *Cyclotella meneghiniana*, que indica condiciones lacustres bajas.

En esta sección de la secuencia los valores del DCA1 son mayormente positivos con valores más altos que en la Zona I, y la zona II (Fig. 15) indicando niveles lacustres más bajos, Los valores de DCA2 son predominantemente positivos, indicando salinidades más elevadas que en la zona I y la zona III., sin embargo se presentan dos oscilaciones puntuales hacia condiciones de agua más dulce a los ca. 750 d.C. y ca.1450 d.C. (Fig.15).

### 5.3.3 Zona III.

La zona III corresponde con los 50 cm a 0 cm (superficie) (1640 – 1958 d.C.). En esta zona domina nuevamente *A. granulata* en conjunto con *Nitzschia amphibia* y *F. capucina*.

En el intervalo de 42 a 30 cm, que corresponde a 1690 – 1750 d.C., disminuye la presencia de *A.granulata* y aumenta la de su variedad *A. granulata* var. *angustissima* , *N. amphibia* y *F. capucina* (Fig. 16). En resumen, en esta zona hay una asociación de diatomeas dominada por *A. granulata*, *N. amphibia*, y *A. granulata* var. *angustissima* (Fig. 16). Los valores del DCA1 son muy variables, oscilando entre valores positivos y negativos (Fig. 15) lo que sugiere una condición fluctuante de profundidad. Algo similar ocurre con el eje DCA2 (Fig. 17) que oscila entre valores positivos y negativos indicando variaciones importantes en la salinidad.

## 6 Discusión.

### 6.1 Periodos de cambio ambiental

#### 6.1.1. Clásico temprano: 130 a.C. a 500 d.C. (2070 a 1450 A.P.)

Esta etapa corresponde al intervalo de 260 a 195 cm que equivale a los años 130 a.C. a 500 d.C., en esta sección hay una dominancia de *A. granulata*, indicando condiciones de aguas relativamente profundas y baja salinidad. Es importante resaltar que al dominar *A. granulata* no se presentan otras especies, esto se puede deber a que es una especie que forma parte del plancton y domina toda la columna de agua aprovechando los recursos. También al tener aguas relativamente profundas no llega la luz al fondo del lago por tanto no hay presencia de diatomeas bentónicas, y es evidente la dominancia de *A. granulata*.

El Ti tiene valores por arriba del promedio y tiene incrementos que concuerdan con las variaciones de *A. granulata*. El Ca/Ti es relativamente bajo lo que apoya la idea de que el lago era de agua dulce (Fig. 16). Se observan, sin embargo, algunas oscilaciones en las que *A. granulata* disminuye su abundancia entre los 230 y 220 cm (ca. 200 d.C.) (Fig. 16), y que coincide con el incremento en el DCA1 , DCA2 y valores bajos de Ti (Fig.15) que sugieren un evento de menor nivel lacustre y mayor salinidad del lago.

#### 6.1.2. Fundación de Xochicalco: 500 a 750 d.C.

Este periodo abarca de 195 cm a 170 cm (500 – 750 d.C. o 1450 – 1250 A.P) e incluye el momento durante el cual ocurre la fundación de Xochicalco alrededor del 600 a 700 d.C. Este es un momento que parece ser de transición ambiental. El lago se encontraba en una fase de aguas profundas y un lago bien definido, indicado por la presencia de *A. granulata* entre 190 y 180 cm (correspondiente de 540 – 660 d.C.), (Fig. 16), y valores de Ti arriba del promedio entre 220 a 190 cm, correspondiente a 250 a 550 d.C., indicando escorrentía al lago.(Fig. 16).

Sin embargo, posteriormente, los valores de Ti comienzan a disminuir gradualmente entre 180 y 170 cm (Fig. 15), correspondientes con 650 y 750 d.C. que es el momento de la fundación de Xochicalco. Aunque en las diatomeas continúa dominando *A. granulata* (Fig. 16), que es indicadora de condiciones de agua relativamente profunda, pero ya se distingue una tendencia hacia una disminución en la escorrentía al lago.

### **6.1.3. Sequia del Clásico Terminal (SCT): 750 a 900 d.C.**

Este intervalo abarca de 170 a 150 cm (750 a 900 d.C. o 1200 a 1000 A.P.). Para el periodo que abarca la SCT los valores de Ti continúan disminuyendo entre 170 a 155 cm (Fig. 15), correspondientes con 750 a 890 d.C., la preservación de diatomeas se vuelve muy mala y con baja abundancia. El valor del DCA2 son positivos, indicando mayor salinidad, todo esto sugiere condiciones lacustres bajas. Este intervalo de nivel lacustre bajo marca el inicio de la zona II (Fig. 15 y 16). Estas condiciones de sequía se correlacionan con la SCT que ocurrieron aproximadamente entre 750 y 900 d.C. (Hodell et al., 2005). Sin embargo durante este intervalo se presenta el auge del desarrollo cultural en Xochicalco, durante el cual tuvo un gran crecimiento económico, cultural y demográfico.

En la sección del núcleo que corresponde a 840 -940 d.C. (entre 160 a 150 cm) no hay presencia de diatomeas (Fig. 16), por lo que podemos identificar en este intervalo un periodo de sequía drástica en la región del lago de Coatetelco que se extiende entre 840 y 950 d.C. Lo que pudo haber afectado a la política y la cultura de Xochicalco debido a un estrés hídrico por la ausencia en un suministro continuo de agua. Este intervalo coincide con un incremento de Ca/Ti, y valores muy bajos de Ti a los 155 cm (890 d.C.), (Fig. 15 y 18), que apoya la interpretación de condiciones áridas. Por lo tanto, los datos sugieren un periodo extendido de sequía que inició alrededor de 750 d.C. (170 cm) que se fue haciendo más intenso hasta el alrededor del 900 d.C. (~155 cm), (Fig. 17).

### **6.1.4. Anomalía Climática Medieval (ACM): – 1100 - 1350 d.C.**

Este periodo abarca de 135 cm a 100 cm (1050 d.C. a 1350 d.C. o 910 a 600 A.P.). Para el periodo que corresponde a la ACM los valores de Ti tienen un máximo que sugieren un incremento breve en la esorrentía a los 950 d.C., y una recuperación en el registro de diatomeas, pero el Ti vuelve a disminuir y se pierde el registro de las diatomeas entre 1140 y 1350 d.C. (correspondiente a 130 y 100 cm.) (Fig. 15 y 16).

Esta ventana de tiempo coincide con el abandono de Xochicalco que ocurre alrededor de 1100 d.C. (correspondiente con 135 cm). En este intervalo *A. granulata* disminuye (Fig. 16), esto indica una nueva reducción en la columna de agua. Por otra parte la geoquímica en esta zona indica una disminución de Ti y un incremento de Ca/Ti entre 1140 a 1250 d.C. (130 a 120 cm), indicando mayor evaporación y disminución en el aporte hídrico al lago (Fig. 15 y 18 ).

#### **6.1.5. Primera parte de la Pequeña Edad de Hielo (PEH): 1350 a 1570 d.C.**

Este intervalo abarca de 100 a 60 cm (1350 a 1570 d.C. o 600 a 380 A.P.). En esta sección observamos una baja abundancia de *Aulocoseira granulata* y dominancia de especies como *Fragilaria capuccina*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia compressa*, *Gomphonema affine*, *Rophalodia gibba*, *Diadlesmis confervaceae*, *Encyonema silesiacum* (Fig. 16), indicando condiciones someras en el lago, ya que muchas de estas especies son de ambientes poco profundos. El DCA1 (Fig.15) muestra oscilaciones hacia valores negativos y positivos, que indican variaciones en la columna de agua.

El Ti muestra valores particularmente bajos alrededor del año 1450 a 1500 d.C. (de 80 a 70 cm), contrariamente el Ca/Ti tiene valores por arriba del promedio (Fig.15). Esta sección corresponde con el periodo del inicio de la PEH. Con esto se corrobora un periodo seco durante el inicio de la PEH en la región, con un incremento en la evaporación y deposición de Ca y un notable decremento en el aporte Ti.

La disminución en Ti durante la PEH se puede explicar por una disminución en la esorrentía al lago y por tanto menores precipitaciones. A nivel regional, la

sequía durante la PEH se ha explicado debido a que la actividad solar disminuyó y esto pudo llegar a ocasionar una respuesta oceánica con cambios de la temperatura superficial del mar (TSM), por lo que ocasionaría una menor evaporación en el océano superficial, llevando a una disminución de los ciclones tropicales para la región central (Lozano et al., 2007).

#### **6.1.6. Segunda parte de la Pequeña Edad de Hielo (PEH): 1570 a 1800 d.C.**

Este intervalo abarca entre 60 a 25 cm (1570 a 1800 d.C. O 380 a 150 A.P.). En esta zona *Aulocoseira granulata* vuelve a dominar (Fig. 16). Los valores de Ti se incrementan entre 1570 y 1700 d.C. (de 60 a 40 cm) (Fig. 15), indicando una recuperación de la profundidad del lago. Posteriormente entre los años 1700 – 1770 d.C. (42 a 30 cm) *A. granulata* nuevamente disminuye y domina su variedad *A. granulata* var. *angustissima* y especies como *Nitzschia apmphia*, *Nitzschia compressa*, y *Gomphonema affine* (Fig. 16). Coincide que, en este intervalo se presenta un incremento por arriba del promedio de Ca/Ti, (Fig. 15) que indica un segundo periodo de elevada evaporación de la columna de agua asociado con la deposición de carbonatos. Por lo que la información brindada en este intervalo por las diatomeas y el incremento de Ca/Ti (Fig. 15 y 16 ) corroboran un segundo periodo seco durante la segunda mitad de la PEH entre 1700 - 1770 d.C., pero posiblemente menos intenso ya que el decremento en el Ti no es tan marcado (Fig. 15 ).

#### **6.1.7. Final de la Pequeña edad de Hielo (PEH): 1800 a 1950 d.C.**

Esta sección corresponde de los 25 a 13 cm (1800 a 1870 d.C. o 150 a 77 A.P.). Se presenta un nuevo máximo de Ca/Ti y una disminución de *A. granulata* y aumento de *Nitzschia apmphia*, *Nitzschia compressa*, y *Gomphonema affine* en sedimentos que datan de 1870 d.C. (15 cm) (Fig. 16), que sugiere una tercera etapa de condiciones secas al final de la PEH.

## 6.2 Comparación con otros estudios paleo - climáticos.

En esta sección compararemos los resultados del estudio de Coatetelco, Mor., con otros registros paleolimnológicos en México como son los registros del lago SMO, Nay. (Rodríguez et al. 2015), Santa Cruz Atizapán, Edo.Mex. (Caballero et al. 2002), Aljojuca, Pue. (Bhattacharyaa et al. 2015), Chichancanab (Hodel et al. 2005) y Punta Laguna, Q. Roo (Hodell et al. 2007).

Encontramos una similitud para el momento del inicio de la SCT, así como también para la PEH, en toda Mesoamérica desde Yucatán hasta el pacífico en Nayarit. Hay evidencias que permiten afirmar que la SCT fue la más importante en Mesoamérica durante los últimos 2000 años (Rodríguez et al., 2015).

En el registro de Coatetelco la SCT se identifica entre 750 d.C. y se extiende hasta el 950 d.C., concuerda con lo observado en el registro de SMO Nay., (Rodríguez et al., 2015), donde se registra la SCT entre 600 – 800 d.C. Por otro lado, en el lago Aljojuca, Pue. (Bhattacharya et al., 2015) la SCT se registra entre 600 a 950 d.C. y en Santa Cruz Atizapán, Edo.Mex. (Caballero et al., 2002) se registra entre 550 – 900 d.C. y esta temporalidad se asemeja a la encontrada para Coatetelco (Fig.18).

En los registros de Punta Laguna y del lago Chichancanab la SCT se identifica entre 600 – 1100 d.C. (Fig.18), esta temporalidad también concuerda con el registro de Coatetelco y el de lago Aljojuca Pue., aunque se extiende temporalmente un poco más (hasta 1100 d.C. vs. 950 d.C. en Coatetelco).

El momento en que se registra la SCT en los distintos estudios paleolimnológicos para Mesoamérica varía de un sitio a otro, pero en general está centrado en un intervalo entre 600 a 900 d.C. y en algunos registros se extiende hasta 1100 d.C. (Fig. 18).

Con respecto al periodo correspondiente a la ACM en Coatetelco, se identifica entre 1140 y 1350 d.C., con una disminución en el Ti y un aumento de Ca/Ti y una disminución de *A. granulata*. En SMO, Nay., este periodo se identifica con una alta variación de Ti entre 1150 – 1400 d.C., también en Aljojuca Pue., este intervalo se

idéntica entre 1100 – 1300 d.C. con un bajo contenido de Al y esta temporalidad concuerda con la identificada en Coatetelco. Con respecto a Punta laguna y Chichancanab no se encuentra un registro claro de este intervalo.

Para el periodo que corresponde a la PEH en el registro de Coatetelco se identificó un primer periodo seco entre 1450 a 1550 d.C. y un segundo periodo seco entre 1700 a 1770 d.C. Esta temporalidad es muy similar a la encontrada en el lago SMO, Nay., donde también se identifica la PEH en donde fases, la primera de (1400 a 1550 d.C.) y la segunda de (1690 a 1770 d.C.) (Rodríguez et al., 2015) (Fig.18). Además también en lago Verde Veracruz se identifica la PEH en dos fases entre 1500 – 1550 d.C. y el segundo de 1650 -1700 d.C. (Lozano et al., 2007), que concuerda con lo observado en Coatetelco. En el registro de Aljojuca Pue., también se identificó entre 1500- 1700 d.C. un decremento y alta variabilidad de Al para el periodo correspondiente a la PEH (Fig. 18) y esta temporalidad se asemeja a la reportada en Coatetelco, SMO, Nay., y Lago Verde Veracruz.

Por lo cual el periodo correspondiente con la PEH se identificó satisfactoriamente en dos fases y concuerda con lo observado en otros registros de Mesoamérica. En general está situado entre 1400 a 1770 d.C. (Fig.18). Los dos periodos de sequía identificados para la PEH en Coatetelco concuerdan con lo observado en otros registros donde también se observa que es un evento que ocurrió en dos fases asociadas con los mínimos solares de Spörer y Mounder.

Además, también estos eventos climáticos se han podido documentar en los sedientos oceánicos de la cuenca de Cariaco en Venezuela (Fig. 18). En este registro oceánico la SCT se reporta entre 800 – 1000 d.C. (Haug et al., 2001) y concuerda con las temporalidades observadas en Coatetelco, SMO, Aljojuca, Punta laguna y Chichancanab para la SCT.

Para el periodo de la ACM en el registro de Cariaco se identifica entre 1000 – 1200 d.C. (Haug, 2001) con una disminución en el aporte de Ti (Fig. 18). Tanto el registro oceánico como los registros lacustres muestran temporalidades semejantes ya que en Coatetelco se identifica la ACM entre 1140 y 1350 d.C., en SMO entre 1100 d.C. – 1300 d.C. y en Aljojuca Pue. entre 1100 y 1350 d.C.

Además en Cariaco también se logra identificar el periodo de la PEH entre 1450 – 1750 d.C., (Haug et al., 2001) con los valores más bajos de Ti de los últimos 2000 años (Fig. 18), y que coincide con los registros paleo- limbologicos de Coatetelco y SMO, Nay., y Aljuca Pue.(Fig. 18). Con respecto a los registros de Punta laguna Q. Roo y Chichancanab Yuc. no se logra identificar claramente este evento.

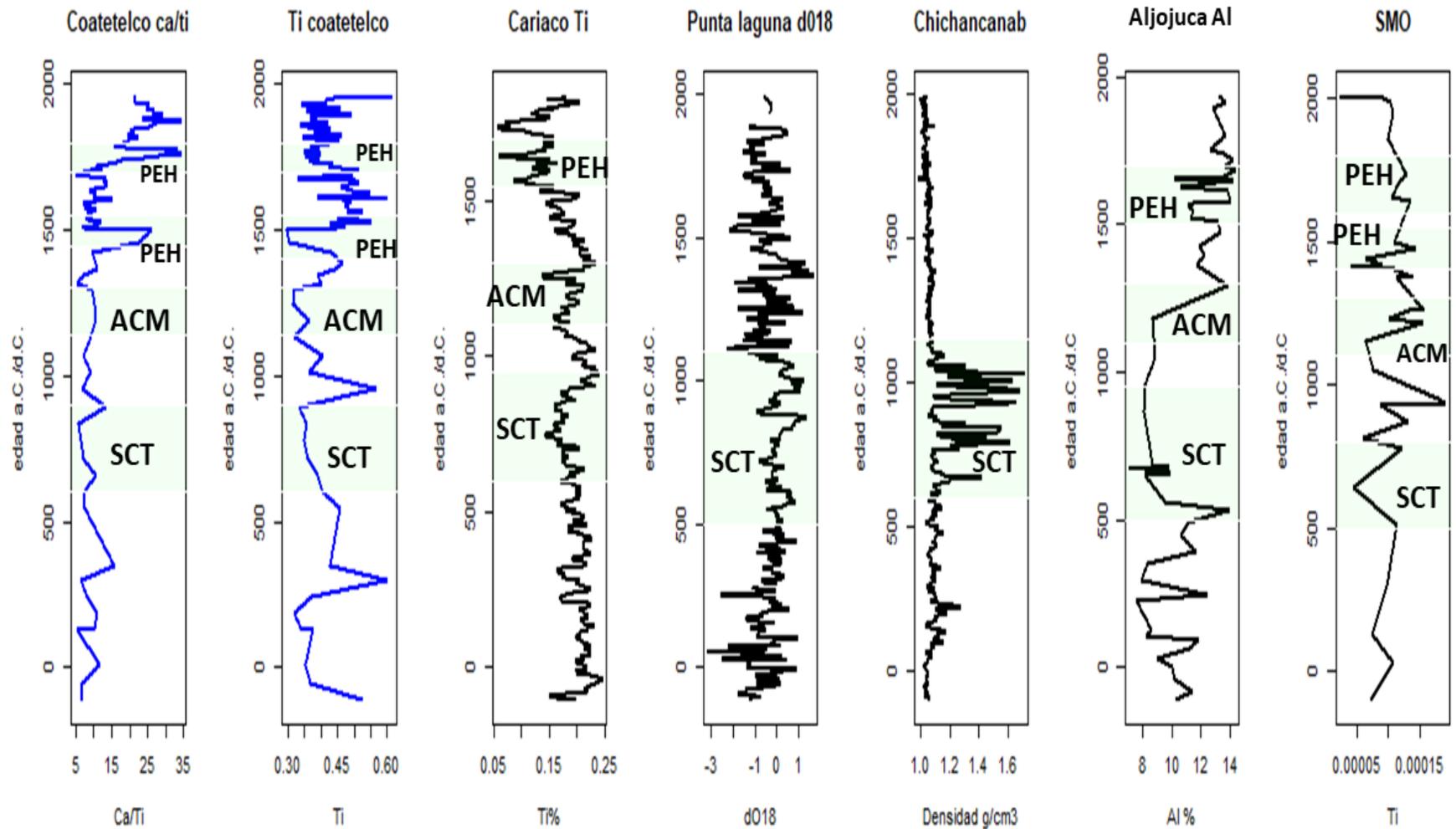


Fig. 18. En esta grafica se hace una comparación de los diferentes registros Paleolimnológicos, con los resultados de Ti y Ca/Ti de Coatetelco (azul), registro de la cuenca oceánica de Cariaco Venez., (Haug, 2001), registro de Punta Laguna Quintana Roo.,(Hodell et al., 2007), registro del lago Chichancanab Yuc., (Hodell et al., 2005), registro de Aljojuca Pue., (Bhattacharya et al., 2015), registro del lago de Santa Maria el Oro Nay.,(Rodríguez et al., 2015).

## 7 Conclusiones.

- ❖ La información brindada por las diatomeas y los indicadores geoquímicos se complementó entre sí. El Ca/Ti y Ti mostraron en general patrones inversos. Los máximos de Ca/Ti permitieron identificar intervalos de evaporación intensa mientras el decremento Ti se interpreta como disminución en la escorrentía por tanto menores precipitaciones. La presencia del conjunto de diatomeas dominado por *Aulaucoseira granulata*, se interpretó como un lago profundo y la presencia del conjunto de diatomeas dominado por *Nitzschia amphibia* y otras especies bentónicas se interpreta como disminución en la columna de agua, reducción del lago e incremento en la salinidad. Los horizontes con mala preservación de diatomeas, sugieren momentos de máxima sequía.
- ❖ El periodo en el que se estableció la ciudad de Xochicalco, alrededor del año 600 a 700 d.C., el lago se encontraba en una etapa de transición de aguas relativamente profundas hacia ambientes más someros. El lago era inicialmente profundo y turbio, ya que *A. granulata* domina en este periodo, pero inicia una tendencia hacia condiciones más someras.
- ❖ Se identificó un periodo seco que comienza ~ 750 d.C., y que es más intenso entre 840 – 940 d.C. Este periodo se identificó por una disminución de *A. granulata*, y una mala preservación de diatomeas, y una disminución en los valores de Ti.
- ❖ La sequía registrada en Coatetelco entre 600 a 950 d.C. corresponde con las SCT (750 a 900 d.C.) y coinciden con el declive de la ciudad de Xochicalco que se registra entre 900 - 1100 d.C. Por lo tanto, la información que aporta este estudio corrobora que el abandono de la ciudad de Xochicalco ocurrió durante un intervalo de clima más seco conocido como la SCT.
- ❖ En el registro de Coatetelco las condiciones de sequía persisten durante la ACM, identificada en este registro entre 1100 y 1350 d.C. En este intervalo hay una mala preservación de diatomeas y una reducción de *A. granulata* y el incremento de *N. amphibia* y *F. capucina*.

- ❖ Se identificó un tercer periodo seco entre 1450 a 1500 d.C., que corresponde con la primera mitad de la Pequeña Edad de Hielo en esta región, está claramente marcado por un incremento de Ca/Ti, y una disminución del Ti. La presencia de diatomeas bentónicas como *Gomphonema affine* y *Rhopalodia Gibba*, apoyan esta interpretación.
- ❖ El último periodo seco entre 1700 -1770 d.C. corresponde a la segunda mitad de la PEH. En este intervalo se presenta un incremento de Ca/Ti y una dominancia de la variedad *A. granulata* var. *angustissima*. Por último, se identificó una etapa que marca el final de la PEH, entre 1800 y 1950 d.C., y que se manifiesta como un incremento en la relación Ca/Ti.
- ❖ El registro de Coatetelco muestra similitudes con estudios previos, ya que los eventos climáticos identificados (SCT, ACM, Y PEH) concuerdan con los registros de Aljojuc Pue., SMO Nay., Punta laguna Q.Roo, Chichancanab Yuc. y Cariaco. Esto enriquece los resultados de este estudio.

## Referencias

- Alley, R.B., Meese, D.A., Shuman, C.A., Gow, A.J., Taylor, K.C., Grootes, P.M., Alvarado León, Claudia I. y Garza Tarazona Silvia, (2010). El carácter defensivo de Xochicalco (650-1 100 d. C.), *Revista de Arqueología Mexicana*, (43), 36-154.
- Alvarado L., C. I. (2015). El espacio construido y los procesos de cambio en la Acrópolis de Xochicalco. *Cuicuilco Revista de Ciencias Antropológicas*, 22(63), 171–203.
- Avendaño Villeda D., y Caballero M.,(2020), Especie *Cyclotella meneghiniana*. En: *Diatomeas: Subclase Thalassiosirophyceae*, portal internet del Laboratorio de Paleolimnología, Instituto de Geofísica.
- Battarbee R.W., Jones V.J., Flower R.J., Cameron N.G., Bennion H., Carvalho L., Juggins S. (2001). Diatoms. In: Smol J.P., Birks H.J.B., Last W (eds), *Tracking environmental change using lake sediments Vol 3: Terrestrial, algal and siliceous indicators*. Kluwer, Dordrecht, 155-202.
- Berlo, J.C, (1989). Early Writing in Central Mexico: In Tlilli, En Tlapalli before A. D. 1000, en: R. A. Diehl y J. C. Berlo (eds.) *Mesoamerica After the Decline of Teotihuacan A. D. 700-900*, Dumbarton Oaks. Washington, D. C.: 19-47.
- Bhattacharyya T., Byrne R., Böhnelt H., Wogau K., Kienel U., Lynn I, Zimmerman S. (2015). Cultural implications of late Holocene climate change in the Cuenca Oriental, Mexico, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(6), 1693 – 1698.
- Blaauw M., Christen J.A.(2011) "Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process." *Bayesian Analysis*, 6 (3) 457- 474, DOI:10.1214/11-BA61.
- Bonilla-Barbosa, J. R., (2009). Factores que afectan los ecosistemas acuáticos y su influencia en la distribución y propagación de plantas acuáticas mexicanas. *Revista Mesoamericana* 13(1), 37-43.
- Braconnot P., Otto-Bliesner B., Harrison S., Joussaume S., Peterchmitt J-Y., Abe-Ouchi, A., Crucifix, M., Driesschaert, E., Fichet, T., Hewitt, C.D., Kageyama, M., Kitoh, A., Laine, A., Loutre, M.-F., Marti, O., Merkel, U., Ramstein, G., Valdes, P., Weber, S.L., Yu, Y., Zhao, Y., (2007). Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum – Part 1: experiments and large-scale features. *Climate of the Past*, 3 (2) 261-277, DOI: 10.5194/cp-3-261-2007. hal-00330718v2.
- Bradley R.S., Hughes M.K., Diaz H.F. (2003), *Climate change. Climate in Medieval time. Science*. (302): 404-405. Doi: 10.1126/science.1090372.

- Caballero y Maidana 2017. Bacillariophyta., en Pérez L., Masafiero J, Correa M., Zurisaidai K., (Ed.), *Paleoindicadores lacustres neotropicales*, UNAM, (2- 20).
- Caballero, M., Ortega B., Valadez F., Metcalfe S., Macías J., Sugiura Y., (2002). Sta. Cruz Atizapán: A 22-ka lake level record and climatic implications for the late Holocene human occupation in the Upper Lerma Basin, Central Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. (186) 217-235. DOI: 10.1016/S0031-0182(02)00502-3.
- Caballero, M., Vázquez, G., Lozano-García, S., Rodríguez A., Sosa S., Ruiz-Fernández, A., Ortega B. (2006) Present Limnological Conditions and Recent (ca. 340 yr) Palaeolimnology of a Tropical Lake in the Sierra de Los Tuxtlas, Eastern Mexico. *J Paleolimnology* (35) 83–97. doi <https://doi.org/10.1007/s10933-005-7427->
- Calzada J.E y Rocatti M., 29/08/2019. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. [www.sagarpa.gob.mx](http://www.sagarpa.gob.mx)
- Cohen M., Crane K., (2007). *Ancient Health. Skeletal Indicators of Agricultural and Economic Intensification*, (eds) University Press of Florida, *Bioarchaeological Interpretations of the Human Past: Local, Regional, and Global Perspectives Series*, 464.
- Correa-Metrio A., Dechnik Y., Lozano-García S., Caballero Miranda M., (2014). Detrended correspondence analysis: A useful tool to quantify ecological changes from fossil data sets., *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, (66)1: 135-143.
- Crowley, T. J. (2000), Causes of climate change over the past 1000 years, *Science*, (289) , 270 - 277, Doi:10.1126/science.289.5477.270
- Dansgaard, W., White, J.W.C., Johnsen, S.J., (1989). The abrupt termination of the Younger Dryas climate event, *Nature*, (339): 532 – 534, DOI: 10.1038/339532a0
- Denton, G. y Karlén, W. (1973). Holocene Climatic Variations Their Pattern and Possible Cause. *Quaternary Research*, 3(2), 155-205. doi:10.1016/0033-5894(73)90040-9.
- Dumond D., Müller F., (1996)., *Del Clásico al Posclásico en el Altiplano Central de México*, en *Antropología de Tlaxcala* (1), en Mirambell L. (Ed.). Instituto Nacional de Antropología e Historia. México: 205-229.
- Emile Geay, J., Cane, M., Seager, R., Kaplan, A., Almasi, P., (2007). El Niño as a mediator of the solar influence on climate. *Paleoceanography* (22): 1-16 , Doi:10.1029/2006PA001304,
- Finlay B.J., Monaghan E.B., Maberly S.C. (2002). Hypothesis: The Rate and Scale of Dispersal of Freshwater Diatom Species is a Function of their Global Abundance *Protist* 153 (3), 261-273, DOI: <https://doi.org/10.1078/1434-4610-00103>.
- Flores, M., Tavera, R., & Novelo, Y.E. (2015). Florística y ecología de diatomeas bentónicas de la zona lacustre de Xochimilco-Tláhuac, México. *Boletín De La Sociedad Botánica De Mexico*, 93, 531-558. DOI: [doi.org/10.17129/botsci.148](https://doi.org/10.17129/botsci.148)
- García Amaro E., (2003). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM* (50), 67-76.
- Garza Tarazona S. y González Crespo N., (1998). La Pirámide de las Serpientes Emplumadas. *Revista de Arqueología Mexicana*, (5) 30, 22-25.

- Gauch, H. (1982). *Multivariate Analysis in Community Ecology* (Cambridge Studies in Ecology). Cambridge: Cambridge University Press. Doi:10.1017/CBO9780511623332
- Gifford H., Geirsdóttir A., Zhong Y., Larsen D.J., Otto B.L., Holland M., Bailey D. A., Refsnider K. A., Lehman Scott J., Southon J. R. Chance A., Björnsson H., Thordarson T., (2012), Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks, *Geophysical Research Letters*, 39 (2), 1- 5, doi:10.1029/2011gl050168.
- Gomez Márquez, J.L., Peña-Mendoza B., Salgado-Ugarte I.H., Sánchez-Herrera A. K. y Sastré-Baez L., (2007). Reproduction of the fish *Poeciliopsis gracilis* (Cyprinodontiformes: Poeciliidae) in Coatetelco, tropical shallow lake in Mexico. *Revista de Biología Tropical* 56(4): 1801-1812. DOI 10.15517/rbt.v56i4.32946.
- González Crespo N., (1999). Mini guía de Xochicalco, Morelos,. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México.
- González Crespo, N., y Garza Tarazona S. (2008). La cronología de Xochicalco. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, (37):122-139.
- Granados-Ramírez J.G., Gómez Marques J.L., Peña Mendoza B., y Martínez-Alaníz M., (2014). Inventario de cuerpos de agua del estado de Morelos. AGT Editor. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México 355.
- Haug G.H., Günther D, Peterson LC, Sigman DM, Hughen KA, Aeschlimann B. Climate and the collapse of Maya civilization. *Science*. (2003) *Science* 299 (5613):1731-5. doi: 10.1126/science.1080444.
- Haug G.H., Hughen KA, Sigman DM, Peterson LC, Röhl U. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. (2001) *Science*, 293 (5533):1304-1308. Doi: 10.1126/science.1059725.
- Haug G.H., Peterson L.C., (2005). Climate and the Collapse of Maya Civilization. *American Scientist*, (93): 322- 329.
- Hill M.O., Gauch, H.G., (1980), Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique, *Vegetatio*, 42: 47-58, Doi <https://doi.org/10.1007/BF00048870>
- Hodell D., Brenner M. y Curtis J. (2007). Climate and Cultural History of the Northeastern Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico. *Climatic Change*. (83): 215-240. DOI: 10.1007/s10584-006-9177-4.
- Hodell D., Brenner M., Curtis J.H., (2005). Terminal Classic Drought in the Northern Maya Lowlands Inferred from Multiple Sediment Cores in Lake Chichancanab (Mexico). *Quaternary Science Reviews* (24):1413 - 1427. DOI:10.1016/j.quascirev.2004.10.013.
- Hodell D., Brenner M., Curtis J.H., Guilderson T. (2001). Solar forcing drought Frequency in the Maya lowlands, *Science* 292, (5520), 1367 -1370.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2001), Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad del grupo de trabajo II, del tercer informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre cambio climático, Cambridge, Cambridge University Press, 1000.
- Lachniet M. y Bernal J.H., Asmerom Y., Polyak V., Piperno D.R. (2012). A 2400 yr Mesoamerican Rainfall Reconstruction Links Climate and Cultural Change. *Geology*, (40), 259-262. Doi:10.1130/g32471.1.
- Lachniet M. y Patterson W. (2009). Oxygen isotope values of precipitation and surface waters in northern Central America (Belize and Guatemala) are dominated by temperature and amount effects. *Earth and Planetary Science Letters.*, (284): 435-446, DOI: 10.1016/j.epsl.2009.05.010.
- Lange-Bertalot, H.; Bak, M.; Witkowski, A. (2011). Eunotia and some related genera. In: *Diatoms of Europe. Diatoms of the European inland water and comparable habitats.* 6:1-747.
- López-Fuerte F. O. y Siqueiros-Beltrones, D. A. (2016). A checklist of marine benthic diatoms (Bacillariophyta) from Mexico. *Phytotaxa*, 283 (3): 201-258.
- Lozano García M.S., Caballero Miranda M., Ortega B., Rodríguez A. y Sosa S., (2007). Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of eastern Mesoamerica, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*(104) 41: 16200–16203. Doi: 10.1073/pnas.0707896104.
- Lozano García, S., Sosa-Nájera, S., Sugiura, Y., Caballero, M. (2005). 23,000 yr of vegetation history of the Upper Lerma, a tropical high-altitude basin in Central Mexico. *Quaternary Research*, 64(1), 70-82. Doi:10.1016/j.yqres.2005.02.010.
- Maasch, K., Mayewski, P., Rohling, E., Stager, J., Karlén, W., Meeker, L., y Meyerson, E. (2005). A 2000 - Year Context for Modern Climate Change. *Geografiska Annaler. Series a Physical Geography*, 87(1), 7-15.
- Mann D.G. (1999). The species concept in diatoms, *Phycologia*, 38:6, 437-495, DOI: 10.2216/i0031-8884-38-6-437.1
- Mann D.G., Vanormelingen P., (2013). An inordinate fondness? The number, distributions, and origins of diatom species. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 60 (4):414 - 420. Doi: 10.1111/jeu.12047.
- Mann M.E., Zhang Z., Rutherford S., Bradley R.S., Hughes M.K., Shindell D., Ammann C., Faluvegi G., Ni, F., (2009) Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly, *Science*, (326): 1256-1260.
- Mann, M. E., Bradley R. S., Hughes M.K.,(1999). Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations., *Geophysical Research Letters* 26 (6): 759–762.
- Márquez Morfín L. y Hernández Espinoza P.O. (2006). Los mayas prehispánicos. Balance de salud y nutrición en grupos del Clásico y el Posclásico”, *Salud y sociedad en el México prehispánico y colonial.*, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Escuela Nacional de Antropología e Historia, 73-102.

- Márquez Morfin L. y Hernández P., (2004). "Aspectos sociodemográficos de la población maya de Palenque durante el Clásico Terminal a través del análisis de las costumbres funerarias y el dato bioarqueológico", *Culto funerario en la sociedad maya*, Memoria de la Cuarta Mesa Redonda de Palenque, Rafael Cobos Palma (ed.), México: Instituto Nacional de Antropología e Historia. 415-442.
- Márquez Morfin L., y Hernández Espinoza P., (2013). Los mayas del clásico tardío y terminal: Una propuesta acerca de la dinámica demográfica de algunos grupos mayas prehispánicos: Jaina, Palenque y Copán. *Estudios de cultura maya*, 42: 53-86.
- Mayewski, P., Rohling, E., Curt Stager, J., Karlén, W., Maasch K., Meekeer D., Meyerson E., Francoise G., Holmgren K., Lee-Thorp J., Rosqvist G., Rack F., Staubwasser M., Schneider R.R., Steig, E. (2004). Holocene climate variability, *Quaternary Research*, 62 (3) : 243-255. Doi:10.1016/j.yqres.2004.07.001
- Metcalfé, S. E., O'Hara, S. L., Caballero, M., y Davies, S. J. (2000). Records of Late Pleistocene-Holocene climatic change in Mexico - A review. *Quaternary Science Reviews*, 19(7), 699-721.
- Mosiño, P., y García E., (1974). The climate of Mexico. *Climates of North America. World Survey of Climatology* 11: 345-404.
- Nichols, D. (2000). *Journal of Field Archaeology*, 27(3), 354-359. Doi:10.2307/530451
- Oksanen J., Roeland k., Legendre P., O'Hara Bob., Simpson Gavin., Solymos P., Stevens M., Wagner H.(2009). *Vegan: Community Ecology Package. R Package Version* (1):15-1.
- Patrick, R.M. y Reimer, C.W. (1975) *The Diatoms of the United States, exclusive of Alaska and Hawaii*, (2) Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia 13
- Ramírez Nava M. y Caballero M., (2019) Género Aulacoseria. En *Diatomeas: Clase Coscinodiscophyceae*, portal internet del Laboratorio de Paleolimnología, Instituto de Geofísica, UNAM.
- Reimer P.J, Baillie M.G., Bard E, Bayliss A., Beck J.W. , Blackwell P.G., Buck C.E., Burr G.S., Culter K.B., Damon P.E., E.R, Fairbanks R.G., Friederich M., Guilderson T.P., Hogg A.G., Kromer B., Guerry M., Sturt Ramsey C.B., Reimer R.W., Southon J.R., Stuiver M., Talamo S., Taylor F.W. van der PJ., E., W. C.(2004). Intcall 13 and marine 13 radicarbon Age Calibration Curves 0- 500, 00 Years Cal B.P. *Radiocarbon* 46(1), 111- 1150.
- Rodríguez Ramírez A, Caballero M., Piyadarsi. R, Ortega B., Vázquez Castro , Lozano S.,(2015). Climatic variability and human impact during the last 2000 years in western Mesoamerica: evidences of late Classic and Little Ice Age drought events. *Climate of the Past* (11):1887 – 1911 Doi: 10.5194/cpd-11-1887-2015.
- Round, F.E., Crawford, R.M. and Mann, D.G. (1990) *The Diatoms. Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge University Press, Cambridge, 747 pp.
- Sarthou G., Timmermans, K., Blain, S., Tréguer, P. (2005). Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review. *Journal of Sea Research*, (53): 25-42.

- Sharer R.J., (1999) La civilización maya. México: Fondo de Cultura Económica, Mexico, 3ra edición , 881.
- Simon N.A., Cras E. F. y Lemée R. (2010) Diversity and evolution of marine phytoplankton. *Biologies* (332):159-170
- Smith V., (2000), The Iconography of Power at Xochicalco, en *Ancient Urbanism at Xochicalco 2*, K. Hirth (ed.). University of Utah Press. Salt Lake City: 57-82
- Soler A.M. y Sánchez F. (2004). Reporte de fechamiento de arqueomagnético Xochicalco. Archivo Técnico, Consejo Nacional de Arqueología. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México.
- Stoermer E.F., Smol J.P. (2001). The diatoms: applications for the environmental and earth sciences. Cambridge University Press, 469.
- Uriarte Cantolla A., (2010). Historia del clima de la Tierra, Gobierno Vazco, 380.
- Vargas Díaz M., Molina Astudillo F.I., García Rodríguez J., Elizalde Arriaga E. (2017). Estado trófico del lago de Coatetelco Morelos, México. *Investigación Agropecuaria*, (14): 145-152.
- Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M. and Widmann, M. (2008), Mid-to Late-Holocene Climate Change, *Quaternary Science Reviews*, (27): 1791-1828.
- Wanner, H., Solomina O., Grosjean M., Stefan Ritz, Markéta J., Structure and origin of Holocene cold events, *Quaternary Science Reviews* (2011) 30: 1- 15 doi:10.1016/j.quascirev.2011.07.010.