



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**ESTUDIO PALEOLIMNOLÓGICO CON BASE EN
ASOCIACIONES DE DIATOMEAS EN EL LAGO
“LA LUNA” DEL NEVADO DE TOLUCA**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Biólogo

PRESENTA:

Martin Salvador Hernandez Vasquez

**DIRECTORA DE TESIS: Dra. Margarita
Caballero Miranda**

Instituto de Geofísica, UNAM

**ASESORA INTERNA: Dra. Erika Lourdes Ortiz
Martínez**



Ciudad de México, 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos Academicos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, desde el Colegio de Ciencias y Humanidades Oriente, la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza y al Instituto de Geofísica por darme la oportunidad de crecer y desarrollarme profesional y académicamente durante los años que ha durado mi estadía en esta notable institución; a través de académicos, directivos y demás personas que hacen posible afianzarse como la máxima casa de estudios de México.

Agradezco ampliamente a la Dra. Margarita E. Caballero Miranda por sus enseñanzas, apoyo y paciencia en la dirección del presente estudio ya que su trayectoria en el área de la Paleolimnología logro sembrar en mi un inmenso interés y una satisfacción por este tipo de estudios.

Agradezco en su totalidad a mi jurado: Biol. Angélica E. González Schaff, Dra. Erika L. Ortiz Martínez, Dra. Bertha Peña Mendoza y al M. en C. Pedro C. Martínez Martínez por su tiempo, comentarios, opiniones y sugerencias que permitieron la mejora del presente escrito.

Al Dr. Alexander Correa así como al grupo de estudiantes que participaron en la perforación de la secuencia estratigráfica.

A la Dra. Gabriela Vázquez así como al Técnico Tiburcio Laez Aponte del Instituto de Ecología (INECOL) Xalapa, por la facilidad en la operación del Microscopio Electrónico de Barrido.

Proyecto SEMARNAT-CONACyT 262970, *Los lagos del Nevado de Toluca México: Centinelas para la detección y análisis de la vulnerabilidad socio-ecosistémica ante los impactos del cambio ambiental global*. Titular Dr. Javier Alcocer.

Proyecto UNAM-PINCC, *Los lagos del Nevado de Toluca, México: Centinelas para la Detección y Análisis del Cambio Ambiental Global*. Titular Dr. Javier Alcocer.

Agradecimientos Personales

A mis padres Cecilia y Salvador por su total e incondicional apoyo, cuidados, confianza, cada uno de sus ejemplos, sus múltiples palabras de aliento que hacen de mi una persona íntegra día a día, así como el inculcarme el gusto hacia la naturaleza y el cuidado de ella. No existe la palabra adecuada con la cual expresar toda mi gratitud por creer en mí y en lo que puedo llegar a lograr.

Isa: Inolvidable cada momento en el que un día en blanco y negro lo pintas de colores y cada color con el tono único que solo tú puedes lograr, Gracias por compartir este tiempo y vivir esta experiencia de ser tesistas juntos, tal vez un poco difícil pero con el objetivo de llegar hasta la meta.

A mis amigos de la carrera en especial de aquel legendario 1151 quienes fueron los primeros en el inicio de este ciclo, que algunos ya cerraron y algunos estamos a punto de cerrar, para iniciar en rumbos diferentes, pero con aquellos recuerdos en donde aprendimos, sufrimos ya sea en campo o clase del cual seguimos hasta el último esfuerzo: Aarón, Adrian, Daniela, Giovanna, Juárez, Luis, Julio, Gabriela, Mariana, Mago, Chucho, Lore.

A mis amigos y compañeros que a lo largo de los diversas clases teóricas y de laboratorio pude conocer, aprender, compartir y de todas aquellas salidas al cine, aquellas pequeñas reuniones, en ocasiones conflictos que siempre resolvimos, gracias por todo el apoyo para llegar hasta este momento: Aline, Ana Gabriela, Axel, Cesar (Rubick), Cesar, Diana G., Dianelly, Diego (manzanito), Erick, Eder, Fanny, Gallo, Gilberto, Giovanni, Gramsci, Isela, Jess, Laura, Leonardo, Lorena, Luz, Martha, Monica, Norma, Oscar, Pablo, Sindy, Salvador, Vianey, Vicky, Viviana, Víctor, Wendy (manzanita) Wendoline Mtz.

Amigas de Psicología, aunque de diferente carrera pude compartir tan buenos momentos con ustedes: Claudia, Daniela, Iztel, Rosa, Yael y Yul sin duda son el claro ejemplo de personas con una exitosa vocación, admiro su capacidad y dedicación total a sus estudios así como su gran éxito desarrollo académico y profesional.

A mis primeros grandes amigos de la UNAM mis Amigos del CCH de los cuales logramos sobrevivir hasta el final: Barbará, Claudia, Citlali, Efraín, Gabriel, Guadalupe, Lulu, Alan, Mariam, Luis T., Alex y Toño.

Adrian, Axel, David, Gaby Zamora., Luis, Pamela, Rafa, Esther, Toño, Salvador, Mariana, Uriel, Viviana, Yazmin. Por ser tan buenos compañeros y amigos, desde que lo conocí en aquel LIF de 2° semestre hasta ahora brindándome un ambiente de confianza, su camino continúa y el éxito lo están logrando.

A mis compañeros del laboratorio de paleolimnología: Alberto, Angeles, Diana, Erick, Iván, Karina, Marisela, Tona y Víctor por sus charlas así como en el desarrollo del trabajo escrito y el proceso de muestras en el laboratorio.

Poco fue el tiempo pero únicas y grandes personas, gracias por hacer muy amena la estadia corta en el MIDE: Erika y Miguel.

Dra. Erika L. Ortiz por ser mi primera profesora de la carrera, por su invaluable ayuda en diversas situaciones académicas, sus valiosos consejos personales y académicos y finalmente por aceptar ser mi asesora interna y cerrar el ciclo de mi carrera bajo su tutela.

A la profesora Biol. Laura Paz y Biol. Ana L. Santana por mostrarme por primera vez lo cuan maravilloso y complejo puede ser el estudio de la vida no dejando en mi duda alguna para dedicar mi tiempo y esfuerzo en el estudio de la carrera.

Al equipo de trabajo que tuve la fortuna de conocer y aprender en mi estadía dentro de laboratorio de paleolimnología: Dra. Beatriz O. Guerrero, Dra. Maria del Socorro Lozano G., M. en C. Itzel Sigala, y el apoyo de la Sra. Aida.

*¿Que sabe el pez del agua donde nada
toda su vida?*

-Albert Einstein

Índice

CONTENIDO	Pág.
Resumen	1.
Introducción	2.
Diatomeas	2.
Variabilidad Climática del Holoceno	4.
Lagos de Alta Montaña	6.
Ojetivos	8.
Objetivos Particulares	8.
Justificación	9.
Zona de estudio	10.
Geología	10.
Clima	12.
Edafología	12.
Vegetación	12.
Fauna y Flora Actual del lago	13.
Hidrología	14.
Antecedentes	15.
Método	16.
Trabajo de Campo	16.
Trabajo de Laboratorio	16.
Trabajo de Gabinete	17.
Análisis de Correspondencia sin Tendencia DCA	18.
Índices de Biodiversidad	18.
Resultados	19.
Descripción de la Secuencia Sedimentaria <i>Luna-II-13</i>	19.
Modelo de Edad	20.
Susceptibilidad Magnética Dependiente de la Masa	22.
Taxonomía de Diatomeas	23.
Estratigrafía de Diatomeas	36.
Índices de Biodiversidad	42.
Discusión	43.

Diversidad de los Conjuntos de Diatomeas.....	43.
Ecología de los Conjuntos de Diatomeas.....	44.
Reconstrucción Paleolimnológica y Paleoclimática	44.
Conclusiones.....	48.
Referencias Bibliográficas	49.

Índice de Tablas

CONTENDIO	Pág.
Tabla 1. Parámetros físicoquímicos promedios del lago La Luna del volcán Nevado de Toluca, México	14.
Tabla 2. Edades basadas en el método ¹⁴ C AMS de muestras obtenidas del núcleo <i>Luna-II-13</i>	20.
Tabla 3. Correlación de fechas del trabajo previo realizado por Cuna <i>et al.</i> , (2013) a partir de abundancias de especies de diatomeas	20.
Tabla 4. Valores de los ejes ambientales establecidos en el DCA	37.

Índice de Figuras

CONTENDIO	Pág.
Figura 1. Estructura esquemática de una diatomea	3.
Figura 2. Ubicación del volcán Nevado de Toluca dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)	10.
Figura 3. Imagen satelital de los lagos La Luna y El Sol.....	11.
Figura 4. Fotografía y esquema de la secuencia sedimentaria <i>Luna II-13</i>	19.
Figura 5. Modelo de edad del núcleo sedimentario <i>luna-II-13</i> del lago La Luna	21.
Figura 6. Fechamientos de radiocarbono en ¹⁴ C, edades calibradas en fechas AP, estratigrafía del registro sedimentario, resultados de susceptibilidad magnética dependiente de la masa, abundancia total de quistes de crisofíceas y abundancia total de diatomeas a lo largo del núcleo <i>luna-II-13</i>	22.
Lámina 1.	34.
Lamina 2.	35.
Figura 7. Vista en SEM de <i>Chamaepinnulaira</i> sp.....	36.
Figura 8. Análisis de Correspondencia sin Tendencia de diatomeas del registro sedimentario <i>Luna-II-13</i> con respecto a las especies en concentración mayor al 5%	37.
Figura 9. Abundancia relativa de especies de diatomeas mayores al >10%, Abundancia total de quistes de crisofíceas, Abundancia total de las especies de diatomeas zonación y análisis de cúmulos (CONISS).....	41.
Figura 10. Riqueza Especifica (S), Índice de diversidad de Shannon (H'), Simpson (D) y Diversidad verdadera (¹ D) de especies a lo largo de las muestras analizadas para diatomeas del registro sedimentario <i>Luna-II-13</i>	42.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue realizar una reconstrucción paleolimnológica en el lago La Luna, uno de los dos lagos de alta montaña ubicados en el centro de México, dentro del cráter del Nevado de Toluca, a través del estudio de una secuencia sedimentaria de 118 cm denominado *Luna-II-13*, obtenida utilizando un equipo de perforación tipo Livingston. Esta investigación se basa en el análisis de diatomeas y de susceptibilidad magnética en esta secuencia y documenta la variabilidad de este ecosistema acuático a lo largo del tiempo. El marco cronológico fue establecido mediante cuatro fechas de radiocarbono por espectrometría de masas (AMS), e indica que el registro en estudio abarca los últimos ~7,500 años cal AP. Se registraron 39 taxones de diatomeas, de los cuales 13 tuvieron abundancias mayores al >5%. Con base en un análisis de cúmulos, realizado por medio de la sub-rutina CONISS dentro del programa TILIA, se identificaron cuatro zonas de diatomeas, que evidencian diferentes condiciones del lago. Las diatomeas, junto con los análisis de susceptibilidad magnética sugieren un mayor aporte de sedimentos en la parte basal del registro, lo que se asocia con la formación del lago en un contexto asociado con procesos de deshielo; la presencia de taxones aerófilos como *Caloneis aerophila*, *Pinularia borealis* y *Chamaepinnularia* sp., indican condiciones de pH circumneutral y un nivel inicialmente bajo del lago hace aproximadamente 6,000 a 4,600 años AP. Los niveles bajos del lago se asocian con un clima más seco en el área. Posteriormente a los 4,600 años AP, el dominio de taxones acidófilos bentónicos, principalmente *Encyonema perpusillum*, reflejan el establecimiento de un lago somero, con pH ácido (pH<6), similares a las actuales en el lago. Estas condiciones se mantuvieron por un largo tiempo, siendo interrumpidas por un intervalo durante el cual se dio paso a especies bentónicas, circumneutrales como *Cavinula pseudocutiformis*, relacionadas con un nivel lacustre nuevamente bajo y un pH circumneutral. Estas condiciones se asocian con climas secos hacia el final de la Pequeña Edad de Hielo entre 1600 y 1900 d.C.. Posterior a esta fecha se registra una recuperación de las condiciones lacustres anteriores, con una dominancia de *Encyonema perpusillum* hasta el presente.

Introducción

El clima de la Tierra a lo largo de su evolución ha estado en constante cambio, debido a ello, surgen preguntas fundamentales sobre el funcionamiento del sistema climático, sus tendencias y posibles cambios a futuro. Desde su inicio, el planeta Tierra se ha visto involucrado en complejos procesos biogeoquímicos, geológicos, biológicos y cambios climáticos, cambios registrados por varios “archivos” de información climática naturales: núcleos de hielo, anillos de árboles, anillos de corales, espeleotemas, sedimentos marinos y sedimentos lacustres (Cronin, 2010).

La paleolimnología es la ciencia que emplea la información preservada en los sedimentos lacustres, necesaria para estudiar las condiciones ambientales pasadas de un cuerpo de agua (Frey, 1988), permitiendo reconstruir la naturaleza y/o variabilidad ambiental de un lago a diferentes escalas temporales, mediante el uso de indicadores físicos, químicos y biológicos. Para poder obtener esta información, es necesario aplicar distintas metodologías como la descripción estratigráfica, el fechamiento, el análisis de microfósiles bioindicadores como pueden ser el polen, ostrácodos, cladóceros, amebas testadas, quironomidos y diatomeas (Wetzel, 1981; Escobar *et al.*, 2005; Puertas *et al.*, 2009; Caballero *et al.*, 2013; Massaferrero *et al.*, 2013; Sigala *et al.*, 2015).

Diatomeas

Las diatomeas (del griego *dia* = "a través de" + *tome* = "corte") son algas unicelulares eucariotas pertenecientes a la clase Bacillariophyceae, con tamaños entre 10 y 200 μm , se trata de uno de los tipos más comunes de fitoplancton, presentes en hábitats marinos, así como en agua dulce, en altas y bajas temperaturas, a diferentes valores de pH, y en ambientes hipersalinos (Seckbach y Kocielek, 2011). Son organismos fotosintéticos, de reproducción asexual y poco frecuente por reproducción sexual, sus cloroplastos presentan lamelas con tres tilacoides y diferentes pigmentos como clorofila a, c2, β , β -caroteno, fucoxantina, y diadionxantina (Jeffrey y Vesk, 1997).

Presentan una cubierta de dióxido de silicio [SiO_2], obtenido a partir de su capacidad de metabolizar el ácido silícico [$\text{Si}(\text{OH})_4$], a través de un proceso denominado biomineralización (Kroger y Poulsen, 2008). La estructura de la pared celular consta de un

par de valvas (epivalva e hipovalva), unidas por bandas silíceas que forman un cinturón llamado cíngulo (Figura 1), juntos valvas y cíngulo, forman el frústulo. Las valvas muestran una gran diversidad de formas y ornamentaciones, que permiten distinguir a las diferentes especies, e inclusive variedades de este grupo (Seckbach y Kociolek, 2011). Han sido divididas en dos grandes grupos debido a su simetría: céntricas, con simetría radial; y penales, con simetría bilateral (Hasle y Syverste, 1997).

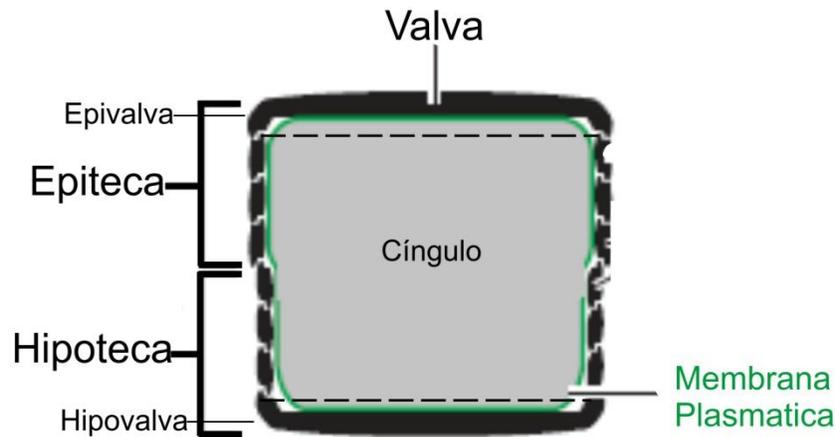


Figura 1. Estructura esquemática de una diatomea.

La evidencia fósil sugiere que las diatomeas tienen un amplio registro, desde el Cretácico inferior (Harwood y Gersonde, 1990), aunque su origen se remonta al Jurásico o inclusive al Triásico ~240 Ma (Medlin *et al.*, 1997; Falkowski *et al.*, 2004). Las primeras diatomeas fósiles son marinas, las formas dulceacuícolas aparecen aproximadamente en el Cretácico superior (~70 Ma). Las formas dulceacuícolas se diversificaron rápidamente durante el Eoceno (~55 Ma), y para el Mioceno (~23 Ma) ya existían la mayoría de géneros dulceacuícolas modernos (Chacon-Baca *et al.*, 2002; Marx y Uhen, 2010).

La teoría más aceptada sobre su origen es la que supone la endosimbiosis de un alga roja, que se vio envuelta por una célula eucariota heterotrófica (Seckbach y Kociolek, 2011). En 2010 se completó la secuencia de todo el genoma de dos especies de diatomeas, y esto reveló información acerca de los orígenes evolutivos y adaptaciones metabólicas que han llevado a su éxito ecológico. Entre los hallazgos más importantes, están la incorporación de genes de sus antepasados endosimbióticos y además por transferencia horizontal de genes de bacterias marinas (Bowler *et al.*, 2010).

Las diversas especies de diatomeas son bastante específicas a las condiciones en las que viven como el pH, alcalinidad, salinidad o profundidad de un lago. Debido a esto y a la gran abundancia que estos microfósiles pueden llegar a tener en los sedimentos, es posible realizar, a partir del estudio de las asociaciones encontradas en una secuencia estratigráfica, estimaciones sobre los valores que presentaron estos parámetros en el pasado (Caballero *et al.*, 2013).

Variabilidad Climática del Holoceno.

El Holoceno abarca los últimos 11,700 años, durante los cuales han ocurrido numerosas oscilaciones climáticas, con cambios térmicos no demasiado acentuados pero con alteraciones significativas, este periodo corresponde con el final del intervalo frío denominado Younger Drays (12,900-11,500 años AP) en Europa y América del Norte (Alley, 2000). A finales del Younger Drays el clima del planeta experimento un aumento en su temperatura promedio, en donde se presentó particularmente un periodo cálido conocido como el Optimo Cálido del Holoceno entre los 9,000 y 6,000 años AP (Kalis *et al.*, 2003), sin embargo, dentro de este periodo alrededor de los 8,200 años AP, se registró un descenso en la temperatura del Hemisferio Norte, reportado originalmente en un cambio negativo registrado en $\delta^{18}\text{O}$ en diversos sondeos en núcleos de hielo en Groenlandia (Tinner y Lotter, 2001). Investigaciones realizadas por Kurek *et al.*, (2002), han cifrado en $\sim 4^{\circ}\text{C}$ la disminución de la temperatura de este evento en Norteamérica, el origen parece estar relacionado con un aumento del flujo de agua dulce y fría procedente del deshielo de los casquetes polares Americano-Groenlandeses hacia el Atlántico norte, modificando las condiciones normales de circulación marina (Bond *et al.*, 1997; Wiersma y Renssen, 2006), aunque al comparar el ^{10}Be y los registros climáticos también puede que esté relacionado con una menor actividad solar (Muscheler *et al.*, 2004). El evento de los 8,200 años AP es de naturaleza similar al Younger Drays desde un punto de vista climático, pero de menor duración (~ 300 -400 años) (Wiersma y Renssen, 2006).

Posteriormente entre los $\sim 6,000$ -5,000 años AP y entre los $\sim 3,000$ -2,500 años AP se reportaron otras dos fluctuaciones climáticas, que muestran una disminución de las temperaturas en latitudes altas y condiciones áridas, en latitudes bajas, otras dos anomalías frías de menor magnitud son reportadas durante el 4,200-3,800 y 1,200-1,000 años AP

(Mayewski *et al.*, 2004). Estos eventos fríos son asociados con los ciclos de Bond, eventos registrados con una periodicidad aproximada de ~500 años asociados a decrementos en la actividad solar y con mayor registro en la zona del Atlántico Norte. (Bond *et al.*, 2001).

Entre los años de 950-1250 d.C. se presentó un periodo en el aumento de la temperatura conocido como el Optimo Cálido Medieval, dicho periodo se caracterizó por el predominio de un clima relativamente cálido en el Norte de Europa (Mann *et al.*, 2009). También otras modificaciones en el clima fueron significativas, como ejemplo en el sur de Europa y otras regiones de América y Asia, donde las condiciones climáticas fueron significativamente más áridas. Este periodo presentó un carácter asincrónico, es decir la respuesta a este evento no ocurre a la vez en todas las regiones del globo, lo que demuestra su gran complejidad como periodo climático de carácter global dificultando el estudio y comparación entre diferentes regiones del planeta (Mann, 2002; Pérez y Boscolo, 2010).

La Pequeña Edad de Hielo (PEH, 1400 a 1900 d.C.) se trata de un periodo relativamente frío ocurrido tras el Optimo Cálido Medieval, en el que se han identificado al menos tres periodos de máximo enfriamiento: alrededor de 1650 d.C., un segundo periodo en 1770 d.C. y el último en 1850 d.C., estos periodos parecen estar asociados con mínimos en la actividad solar (ejemplo el Mínimo de Maunder 1645-1715 d.C.; Mínimo de Dalton 1790-1820 d. C.) y también a la actividad volcánica. Un ejemplo de esto último es la erupción del volcán Tambora en 1815, que tuvo como consecuencia una disminución considerablemente del paso de la luz durante varios meses, situación similar ocurrida en 1991 tras la erupción del monte Pinatubo, provocando un descenso de la temperatura media de ~0.5° C. (Self *et al.*, 1999; Bradley *et al.*, 2003; Pérez y Boscolo, 2010; Uriarte, 2010; Steinhilber y Beer, 2011).

Finalmente, en los últimos siglos la huella del ser humano en el registro geológico se ha caracterizado por los efectos en el desarrollo tecnológico y la sobreexplotación de los recursos naturales. Se ha introducido el término Antropoceno con inicio a partir de la revolución industrial en 1750, se encuentra asociado con explotación de varias fuentes de energía como son el carbón, el petróleo y el gas. A raíz de esto los niveles de dióxido de carbono atmosférico han aumentado desde 260-280 ppm en los inicios del Holoceno hasta 379 ppm en el año 2005. Actualmente, existe un consenso apoyado por varios científicos,

con respecto al aumento de la temperatura global registrado en las últimas décadas. Las causas principales relacionado a lo anterior ha sido por el aumento de las actividad desarrolladas por la humanidad (Zalasiewicz *et al.*, 2008).

Lagos de Alta Montaña

Los lagos de alta montaña se definen como ecosistemas lénticos que se encuentran por encima de la línea de crecimiento arbóreo, la cual fluctúa entre los 3,500 y 4,500 msnm en latitudes tropicales (Sommaruga, 2001; Margalef, 1983). La mayoría de estos lagos han sido originados por actividad volcánica o por retracción glaciaria, generalmente poco profundos (Burgis y Morris, 1987), siendo su principal aporte de agua la atmósfera directamente como precipitación y nieve e indirectamente como deshielo (Battarbee *et al.*, 2002). Estos lagos son en su mayoría polimícticos y con aguas que presentan bajas temperaturas, reciben altas cantidades de radiación UV, en general las aguas de este tipo de lagos están poco mineralizadas, son aguas ácidas, y con poca concentración de materia orgánica disuelta (Sommaruga, 2001), además de tener un bajo contenido de nutrientes (oligotróficos) (Battarbee *et al.*, 2002).

Esta combinación de factores específicos hace que los lagos de alta montaña tengan una alta sensibilidad a cambios ambientales, además debido a su emplazamiento remoto, alejado de las áreas con una fuerte actividad antropogénica, los ecosistemas lacustres de alta montaña constituyen unos sensores excelentes que registran los cambios ambientales pasados y presentes (Catalán *et al.*, 2006).

En México, la accidentada topografía del país favorece el desarrollo de una gran variedad de cuerpos de agua dentro del territorio, se estima que en el país existen cerca de 70 lagos cuya extensión varía entre mil y diez mil hectáreas (Aguilar, 2003), sin embargo de toda la diversidad solo existen dos lagos de alta montaña: El Sol y La Luna (De la Lanza-Espino y García, 1995), ambos situados dentro del cráter del Nevado de Toluca en el eje neovolcánico transversal, coincidiendo con el límite de las regiones Neártica y Neotropical de México.

Debido a estas razones es fundamental recopilar información limnológica y paleolimnológica de estos sistemas acuáticos. El presente trabajo es parte de un esfuerzo

más amplio (Proyecto SEMARNAT-CONACyT 262970) para comprender el funcionamiento presente y pasado de estos lagos, y en particular se centra en el estudio paleolimnológico de la secuencia lacustre total de uno de estos lagos, el lago La Luna.

Objetivos

Caracterizar los cambios registrados en el lago de alta montaña La Luna a lo largo de su historia, utilizando principalmente a las diatomeas como bioindicadores paleolimnológicos, complementado con datos de estratigrafía, susceptibilidad magnética y fechamientos, para definir un modelo de evolución temporal de este lago.

Objetivos Particulares

1. Recuperar la totalidad de la secuencia sedimentaria del lago La Luna.
2. Realizar la descripción estratigráfica y submuestreo para fechamientos, análisis de diatomeas y susceptibilidad magnética en la secuencia sedimentaria proveniente del lago La Luna, denominada *Luna-II-13*.
3. Procesar las muestras obtenidas para el análisis de diatomeas en el laboratorio y preparar laminillas permanentes.
4. Determinar la abundancia relativa de las especies y la concentración total de diatomeas presentes en cada muestra.
5. Calcular índices de biodiversidad con base en la abundancia y dominancia de especies dentro del registro sedimentario *Luna-II-13*.
6. Determinar la susceptibilidad magnética de la secuencia sedimentaria *Luna II-13*.
7. Desarrollar un modelo cronológico para la secuencia *Luna II-13* mediante fechamientos por radiocarbono.
8. Integrar los resultados para definir el modelo de evolución temporal del lago La Luna.

Justificación

Las características remotas y poco perturbadas que presentan los lagos de alta montaña los vuelven sensibles a variaciones climáticas. Estas variaciones quedan registradas en las secuencias sedimentarias que se acumulan en sus fondos. En México solo existen dos lagos de alta montaña, El Sol y La Luna. Se seleccionó el lago La Luna para documentar el origen y evolución de este lago mediante el estudio de la susceptibilidad magnética y el contenido de diatomeas en sus sedimentos, y relacionar su evolución con cambios pasados en el clima.

Zona de estudio

Geología

El Nevado de Toluca, también conocido como “Xinantecatl” cuyo significado de origen náhuatl es hombre o señor desnudo (Yarza, 1992), o como “Chicnauhtecatl” que significa nueve aguas (García-Martínez, 2000), se localiza en las coordenadas 19° 06' 30'' N y 99° 45' 30'' W, en el límite entre el sector central y oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (Figura 2).

Es un estratovolcán en estado de quietud, de composición andesítico-dacítica situado sobre una compleja secuencia de formaciones metamórficas y sedimentarias del Jurásico-Cretácico, el cual inició su actividad en el Plioceno tardío, aproximadamente hace ~2.6 Ma (García-Palomo *et al.*, 2002). Entre los eventos volcánicos más recientes destacan tres erupciones Plinianas que produjeron depósitos identificados como Pómez Toluca Inferior hace (26,000 a 21,700 14C AP) (Capra *et al.*, 2006), Pómez Toluca Media hace 14,000 años (12,100 14C AP, Arce *et al.*, 2006) y Pómez Toluca Superior hace 12,500 años (10,500 ¹⁴C años AP, Arce y Vázquez, 2003). El último evento de actividad reportado para el Nevado de Toluca es una erupción fretomagmática fechada hace 3,700 años (3,300 14C años AP) (Macias *et al.*, 1997).

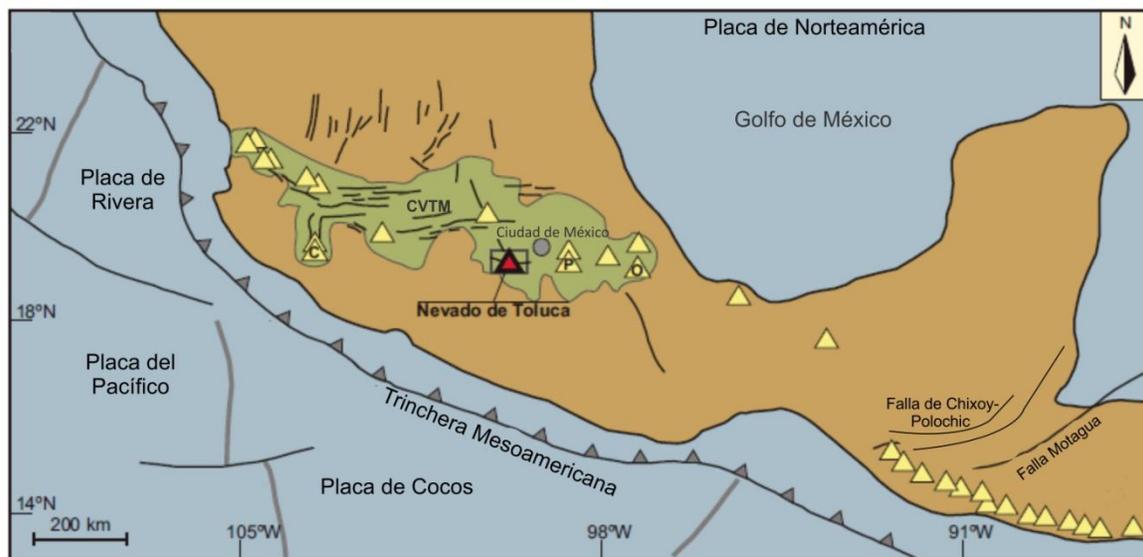


Figura 2. Ubicación del volcán Nevado de Toluca dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), los triángulos muestran otros grandes volcanes, entre ellos: O-Pico de Orizaba; P-Popocatepetl; y C-Volcán de Colima, modificado de Norini *et al.*, (2008).

Se piensa que el cráter actual del Nevado de Toluca se originó después de la erupción de hace ~12,500 AP. El cráter mide aproximadamente 2 x 1.5 km de diámetro mayor y menor, tiene la forma de una gran herradura abierta en dirección este y en su interior, se encuentran los lagos El Sol y La Luna, separados por la intrusión de un domo dacítico conocido como “El Ombligo” que se formó al terminar la erupción de hace ~12,500 AP (Figura. 3) (Arce y Vázquez, 2003).

Durante el final del Pleistoceno e inicio del Holoceno el cráter debió haber estado cubierto de hielo debido al avance de los glaciales que ocurrieron entre los 12,000 y 10,500 y 8,300-7,300 años AP. (Vázquez-Selem, 2003; Vázquez-Selem y Heine, 2011), fechamientos en rocas del ombligo indican el primer deshielo a los ~9,100 años AP y el segundo a los ~7,400 años AP (Arce y Vázquez, 2003).

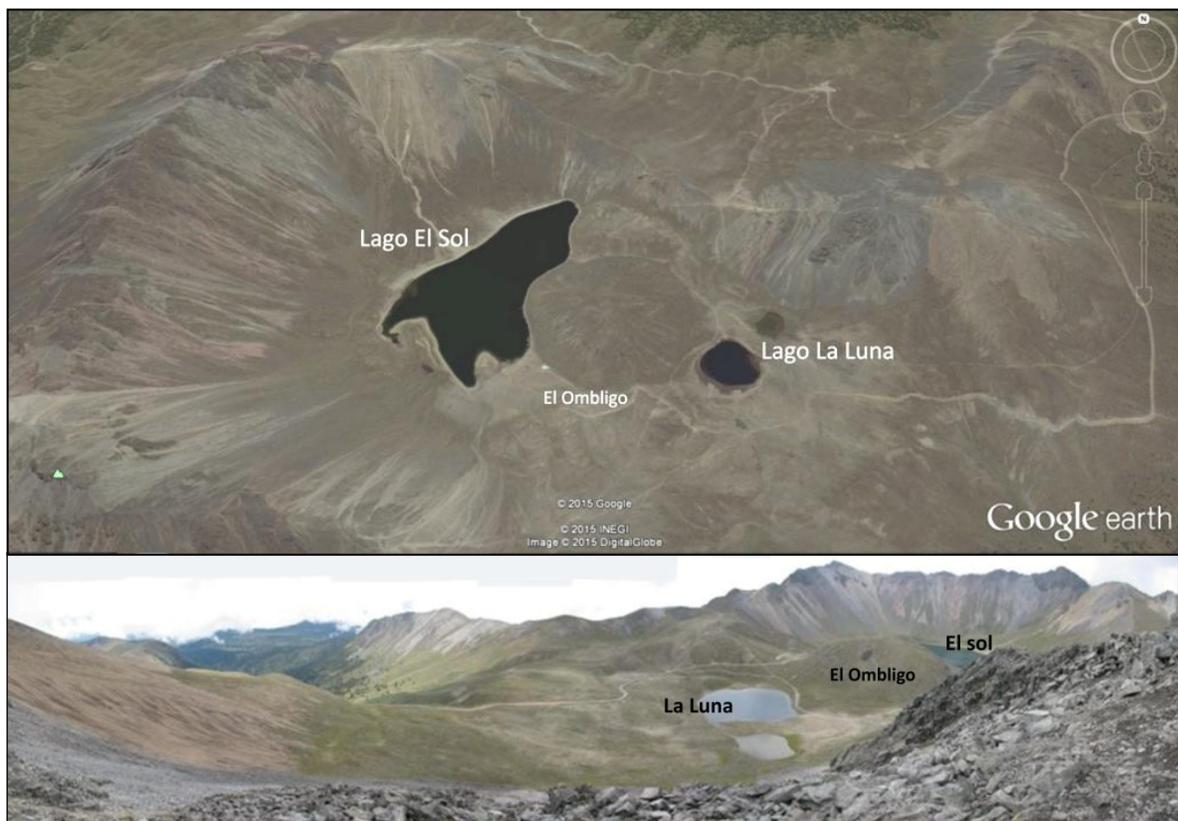


Figura 3. Imagen superior: Imagen satelital de los lagos La Luna y El Sol, Imagen inferior: panorámica dentro del cráter (obtenida de Google Earth 2015).

Clima

La región del Nevado de Toluca se caracteriza por presentar un clima frío a semifrío con lluvias en verano (García, 1988). La estación meteorológica ubicada en el municipio de Zinacantan, cerca de la cima del volcán (4,283 msnm), reporta una temperatura media anual de 3.9°C, con las temperaturas medias mensuales más bajas registradas en enero de 2.3°C y las más altas en mayo con 5.2°C. La precipitación anual media es de 1,227 mm y la evaporación anual media de 970 mm; la mayor precipitación es en el mes de julio con una media 243 mm (SMN, 2015).

Edafología

Los suelos de las zonas alpinas como el Nevado de Toluca son suelos aireados e inestables. En estas condiciones los procesos de congelación y deshielo (postsolización) provocan un batido (levantamientos) del suelo, produciendo un efecto negativo para el desarrollo de los sistemas radiculares profundos de los árboles además se desarrollan redes de deslizamientos y microrelieves ondulados (Daubenmire, 1979; García y Calderón, 2011).

Vegetación

Los tipos de vegetación que se encuentran en las faldas del volcán Nevado de Toluca son: bosques de coníferas, principalmente de *Abies religiosa*, localizados a una altitud de 3,000 a 3,500 msnm, bosques de pino como los bosques de *Pinus pseudostrobus* y *P. ayacahuite* de 2,800 a 3,200 msnm, bosques de *P. montezumae* de 3,000 a 3,200 msnm y bosques de *P. hartwegii* de 3,500 a 4,000 msnm. Sobrepassando los 4,000 msnm y dentro del cráter la vegetación es típica de tundra alta, con predominio de zacatonal alpino, algunas gramíneas altas, amacolladas y líquenes, este tipo de vegetación es conocido como paramo de altura (Vela *et al.*, 1976; Rzedowski, 1981; Almeida-Leñero *et al.*, 2004).

Fauna y Flora Actual del lago

La flora de diatomeas reportada para el lago La Luna de acuerdo al trabajo realizado por Caballero (1996), se encuentra dominada en mayor proporción por *Encyonema perpusillum*, *Psammothidium helveticum*, *Psammothidium helveticum* y *Navicula* NTA, esta última probablemente endémica de este lago y en conclusión de la autora la diferencia a la flora de diatomeas entre el lago El Sol (dominado por *Cavinula pseudocutiformis*) y La Luna se reporto al bajo pH que este último presenta. Alcocer *et al.*, (2004) reporto la presencia de algas bentónicas en menor proporción en comparación con el lago El Sol y menor biomasa fitoplanctónica en La Luna.

Con respecto a la fauna del lago Sarma *et al.*, (1996) realizaron un análisis de rotíferos para ambos lagos, se encontro un total de 35 especies de las cuales 10 están presentes en La Luna (*Lepadella acuminata*, *Lepadella ovalis*, *Lepadella patella*, *Lepadella rhomboides*, *Lecane inopinata*, *Cephalodella tenuiseta*, *Thrichocerca bidens*, *Thrichocerca similis*, *Thrichocerca tigris*, *Dicranophorus grandis*). En relación al bentos Oseguera, (2004), reporta un oligoqueto (*Limnodrilus hoffmeisteri*) y un quironómido (*Pagatsia* sp.). Cuna *et al.*, (2013) reporto a *Alonella manuela*, *Ilycryptus nevadensis* y *Daphnia longispina* como los cladóceros dominantes en estos lagos, las dos primeras posiblemente endémicas de ellos.

Actualmente no hay vertebrados en La Luna, aunque en algún momento de su historia se menciona la introducción de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) durante la década de 1940-1950 (Cuna *et al.*, 2013; Cuna, 2015). En el lago El Sol la trucha también fue introducida y existe actualmente.

Hidrología

Ambos lagos presentan temperaturas frías de aproximadamente $<10^{\circ}\text{C}$, llegando en ocasiones a congelarse brevemente en las estaciones más frías del año. El Sol tiene una superficie de $237,321\text{ m}^2$, mientras que La Luna tienen una superficie de $31,083\text{ m}^2$. Ambos lagos son permanentes y someros (El Sol $\text{Max}= 15\text{ m}$, La Luna $\text{Max}= 10\text{ m}$), con una transparencia elevada (El Sol $\text{D.S}=3-8\text{ m}$, La Luna $\text{D.S}= 4-9\text{ m}$), una conductividad baja (El Sol = $15-18\ \mu\text{S cm}^{-1}$, Luna = $12-15\ \mu\text{S cm}^{-1}$) y pH ácido (El Sol con un promedio de 5.5 y La Luna un promedio de 4.7); son lagos bien oxigenados con un régimen de mezcla polimictico cálido (Tabla 1). Debido a la concentración limitada de nutrientes y baja productividad primaria en la columna de agua reflejada en la transparencia de sus aguas, se les reconoce como sistemas de oligotróficos a ultraoligotróficos (Caballero, 1996; Sarma *et al.*, 1996; Armienta *et al.*, 2000; Alcocer *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, 2004; Ibarra *et al.*, 2007; Cuna *et al.*, 2013).

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos promedios del lago La Luna volcán Nevado de Toluca, México.
ND= no determinado, *Disco de Secchi

	Caballero (1996)	Sarma <i>et al.</i> (1996)	Alcocer <i>et al.</i> (2004)	Ibarra <i>et al.</i> (2007)	Cuna <i>et al.</i> (2013)
Profundidad (m)*	8	9.15	7-9	ND	9.3
Visibilidad (m)*	8	9.15	4-9	ND	8.3
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	9	9-11	8.5	8.6	9.4
pH	4.87	5.2-5.7	4.7	5.4	6.2
O.D (mg L-1)	ND	4.4-7.8	6.8	7.0	6.9
K₂₅ ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	17.3	15.30	14	6.1	9
Alcalinidad (mg L-1)	6.10	4-5	ND	ND	3.9

Antecedentes

El estudio realizado por Cuna *et al.*, (2013) en el lago de La Luna se basó en una secuencia de sedimentos con resolución decadal. A través de diversos parámetros se pudo identificar las tendencias climáticas ocurridas en un intervalo de 800 años, entre 1210 a 2010, abarcando el registro de oscilaciones climáticas globales como La Pequeña Edad de Hielo (PEH), la cual se identificó como un intervalo frío y relativamente seco que inicia en 1360 d.C. y se extiende hasta 1910. Destaca el periodo entre el 1660 a 1760, que lo correlacionan con el Mínimo de Maunder, como un intervalo más seco y frío con respuesta en la sensibilidad de los organismos a este cambio de temperatura. El intervalo de 1760 a 1910 es representado por climas menos fríos pero todavía secos, con una recuperación de la temperatura del lago que se asocian a un aumento en el pH del lago inferido a partir de un cambio en las asociaciones de diatomeas presentes, cuando *Cavinula pseudocutiformis* es abundante en La Luna. A partir de 1910 se establecen las condiciones modernas del lago.

Método

Trabajo de Campo

El núcleo sedimentario denominado *Luna II-13* procedente del lago La Luna fue obtenido por el Dr. Alexander Correa mediante un equipo de perforación tipo Livingstone, con tubos de aluminio de 1 m de longitud y 6 cm de diámetro, operado desde una plataforma de madera apoyada sobre dos lanchas inflables.

Trabajo de Laboratorio

Los tubos de aluminio recuperados fueron cortados de forma longitudinal con el propósito de obtener dos mitades longitudinales del núcleo. Las secciones obtenidas fueron descritas (color del sedimento y textura) y cuatro horizontes fueron seleccionados para realizar fechamientos de ^{14}C . Posteriormente se procedió a tomar muestras cada 1 cm para los diferentes análisis; para esto se utilizó un muestreador de un 1 cm^3 de capacidad y frascos de plástico debidamente etiquetados. De esta forma se obtuvieron muestras de los mismos horizontes para los estudios de diatomeas (1 cm^3) y de otros indicadores biológicos, físicos y químicos. Para el análisis de susceptibilidad magnética el sedimento fue colectado en cada horizonte en cubos de acrílico de 3.38 cm^3 .

La susceptibilidad magnética fue medida en 111 muestras del núcleo *Luna II-13* en baja (LF, 0.465 kHz) y alta (HL, 4.65 kHz) frecuencia en un susceptibilímetro Bartington MS2 con un sensor MS2B. Para calcular la susceptibilidad magnética dependiente de la masa (χ) los valores de susceptibilidad magnética de baja frecuencia se normalizaron contra la densidad del sedimento obteniéndose un parámetro adimensional.

Las muestras para el análisis de diatomeas fueron congeladas, liofilizadas y pesadas. Para la limpieza de diatomeas, se tomó un máximo de 0.5g de sedimento de cada muestra (o la totalidad de la muestra si el peso fue menor a 0.5g) y se trató sucesivamente con 10 ml ácido clorhídrico al 10% con la finalidad de eliminar carbonatos presentes y con 30 ml de peróxido de hidrogeno con pirofosfato de sodio, con la finalidad de eliminar la materia orgánica y dispersar el sedimento. Se colocaron las muestras en una parrilla de

calentamiento, hasta que el peróxido de hidrogeno terminó de reaccionar con la materia orgánica presente.

Concluida la reacción se agregaron 5 ml de ácido nítrico, con la finalidad de eliminar restos de materia orgánica restantes. Posteriormente se procedió a enjuagar las muestras, decantando mediante una línea de vacío hasta obtener un pH neutro. La muestra ya limpia se transvasó a una botella de plástico de 30 ml. Para el montaje de las muestras se tomó una alícuota de 1 ml, realizando pruebas de dilución de 1:5, 1:10 y 1:20 con la finalidad de observar que dilución presenta una mejor dispersión de las diatomeas, definida la disolución adecuada se tomó una alícuota de 200 μ l con una micropipeta, se montó en un cubreobjetos, con cuidado de que no desborde la alícuota y se dejó evaporar por 12 hrs. Las preparaciones se montaron con resina Naphrax y finalmente fueron etiquetadas.

Las preparaciones se observaron bajo un microscopio óptico OLYMPUS BX50 con el objetivo de 100x, en cada preparación se realizaron conteos por transectos hasta llegar a un mínimo de 300 valvas, excepto en aquellas preparaciones que tuvieron baja abundancia donde se realizaron conteos de solamente 100 valvas. Para la identificación taxonomica se tomaron fotografías utilizando una cámara OLYMPUS DP-20 junto con el programa de manejo de imágenes correspondiente.

Trabajo de Gabinete

Se realizó la identificación taxonómica con base en literatura especializada (Krammer y Lange-Bertalot, 1986; 1988; 1991) y utilizando algunas bases de datos especializados (Spaulding *et al.*, 2010). Para las especies más importantes en el registro se realizó una descripción taxonómica en la que se incluye datos ecológicos y bibliografía relevante.

Los datos de conteos de cada especie fueron transformados en abundancias relativas (porcentajes) y para cada muestra se realizó el cálculo de abundancia total, expresada como concentración de valvas por gramo de sedimento seco (v/gss), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Diatomeas por } 10^6 \text{ en 1 g de sedimento} = \text{Pt} \frac{[(A)(Vt)(f)]}{[(a)(Vpp)(x)]}$$

Pt = diatomeas promedio por transecto.

A = área del cubreobjetos.

Vt = volumen final de la muestra (30 ml).

f = dilución.

a = área del campo visual del transecto.

Vpp = alícuota de la preparación (200 µl).

x = gramos iniciales de sedimento.

La matriz de datos se procesó mediante el programa TILIA (Grimm, 2004) para obtener las gráficas de abundancia relativa de las especies con relación a la profundidad, permitiendo visualizar la distribución de las especies a lo largo de la secuencia estratigráfica y del tiempo. El uso de la rutina CONISS dentro de TILIA permitió un análisis de agrupamiento estratigráficamente delimitado, mediante el cual se identificaron grupos de muestras que presentan el mismo conjunto de diatomeas. Este análisis se utilizó como base para dividir la secuencia en etapas paleolimnológicas.

Análisis de Correspondencia sin Tendencia DCA

El análisis de correspondencia sin tendencia (DCA por sus siglas en inglés) es una técnica de estadísticas multivariada que cuando se aplica a una secuencia estratigráfica puede ser usada para identificar cambios ecológicos a través del tiempo (Correa-Metrio *et al.*, 2014). Para este análisis se utilizaron las abundancias relativas de la secuencia sedimentaria *Luna-II-13* a través del programa estadísticos Past.

Índices de Biodiversidad

El programa Past también se empleó para calcular la riqueza específica (S) y los índices de Simpson (D) y de Shannon-Weiner (H') y la diversidad verdadera (¹D) con el objetivo de obtener información sobre la estructura de la comunidad de diatomeas preservadas en el registro sedimentario *Luna-II-13*. Las fórmulas utilizadas en cada caso fueron:

Índice Simpson: $D = \sum_{i=1} (n_i/N)^2$

Diversidad Shannon-Wiener: $H' = \sum [(n_i/N) \ln (n_i/N)]$

Diversidad verdadera: ${}^1D = e^{H'}$

Donde n_i es el número de individuos de la especie, N es el número de individuos totales.

Resultados

Descripción de la Secuencia Sedimentaria *Luna II-13*

La secuencia sedimentaria *Luna II-13* tiene una longitud de 118 cm (Figura 4), entre la base de la secuencia y los 93 cm el sedimento es predominante arena fina, color gris oscuro con bandeamientos de tonalidad; se detectó la presencia de líticos rojizos hacia la base (118-116 cm). Entre los 93 cm y 84 cm el sedimento ya no presenta bandeamientos y entre los 84 y 79 cm el sedimento cambia, es de color café oscuro, con una textura limo-arcillosa con arena fina. Entre 79 y 78 cm existe una tefra formada por arenas finas de color pardo. A los 78 y 70 cm el sedimento cambia a una tonalidad gris oscura, manteniendo la misma textura limo-arcillosa con arena fina. Por arriba de los 70 cm el sedimento es de color negro con la presencia de gravillas y arena fina hasta los 24 cm y negro con abundante materia orgánica en los primeros 10 cm.

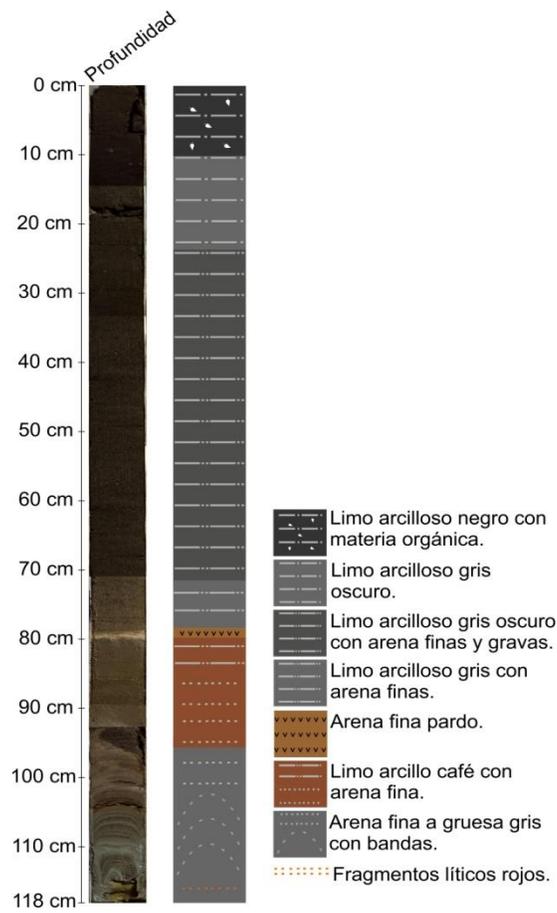


Figura 4. Fotografía y esquema de la secuencia sedimentaria *Luna II-13*, lago La Luna, Nevado de Toluca, México.

Modelo de Edad.

El marco cronológico de la secuencia sedimentaria se realizó a partir de cuatro muestras fechadas mediante el método ^{14}C , en el laboratorio Beta Analytic por medio de espectrometría de masa con aceleradores (AMS por sus siglas en ingles) (Tabla 2). Dichas edades fueron calibradas con el programa Calib 7.1 (Stuiver y Reimer, 1993. disponible en: <http://calib.qub.ac.uk/calib/calib.html>), utilizando la base de datos para el Hemisferio Norte IntCal13, además se utilizaron para afinar este modelo cronológico dos horizontes marcadores, obtenidos por cambios en la abundancia de algunas especies de diatomeas establecidas por el trabajo previo realizado por *Cuna et al.*, (2013) (Tabla 3).

Tabla 2. Edades basadas en el método ^{14}C AMS de muestras provenientes del nucleó *Luna-II-13* lago La Luna, Nevado de Toluca, México.

Clave Beta Analytic.	Muestra (cm)	Material fechado	Edad convencional ^{14}C A.P.	Edad calibrada A.P	Edad a.C. / d.C.
Beta-422019	21	Materia orgánica	830 ± 30	740 ± 50	1260 ± 1160 d.C.
Beta-422020	51	Materia orgánica	3200 ± 30	3420 ± 50	1415 ± 1520 a.C.
Beta-403147	80	Polen	4930 ± 30	5645 ± 60	3650 ± 3770 a.C.
Beta-422021	83	Materia orgánica	4910 ± 30	5630 ± 40	3640 ± 3715 a. C.

Tabla 3. Correlación de fechas del trabajo previo realizado por *Cuna et al.*, 2013 a partir de abundancias de especies de diatomeas, lago La Luna, Nevado de Toluca, México.

<i>Cuna et al.</i> , 2013	Profundidad asignada en <i>Luna-II-13</i> (cm)	Edad calibrada aproximada A.P	Edad d.C.
Disminución de <i>C. pseudocutiformis</i>	7	~40	~1910 d.C.
Máximo <i>C. pseudocutiformis</i>	15	~140	~1810 d.C.

Con las edades calibradas y los dos horizontes marcadores se desarrolló un modelo de edad en el cual la base de la secuencia tiene un alcance cronológico de 6,500 cal y en la cima una edad aproximada de 1985 d.C. (Figura 5). Las tasas de sedimentación son variables a lo largo del núcleo, pero en la mayor parte de la secuencia tienen un valor cercano a 0.1 mm/año, con valores más altos en la parte basal de la secuencia (>80 cm, 0.37 mm/años) y hacia la cima (<20 cm, 0.8 mm/año). Sin embargo, si la tasa de sedimentación cercana a 0.1 mm/años se asume entre el último nivel fechado y la base de la secuencia el alcance temporal podría ser mayor, de un poco más de 8,000 cal AP. De acuerdo con este modelo

de edad, el horizonte de tefra presente entre los 79-78 cm tiene una edad de 5,600 cal AP (Figura.5).

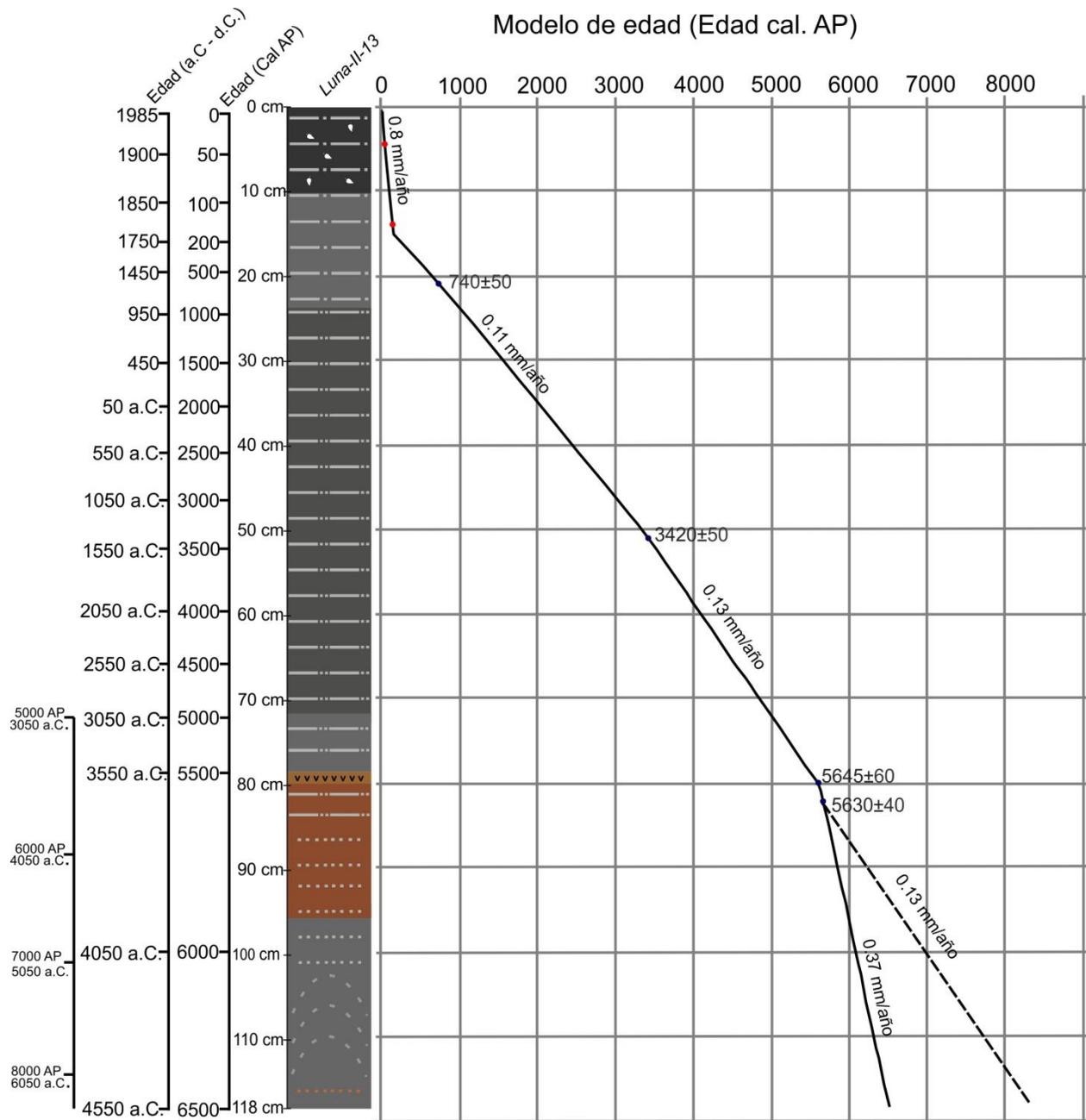


Figura 5. Modelo de edad contra profundidad del núcleo sedimentario *Luna-II-13* del lago La Luna.

Susceptibilidad Magnética Dependiente de la Masa (χ)

La susceptibilidad magnética dependiente de la masa (χ), muestra sus valores más altos (>0.006) en cuatro intervalos del registro sedimentario: hacia la base del registro entre los 118 y 93 cm ($>6,000$ cal AP), en el horizonte de tefra de 79-78 cm y hasta los 71 cm (5,500-4,900 cal AP), así como en las muestras entre los 36 y 32 cm (2,000 y 1720 cal AP, 130 a.C. y 230 d.C.) y hacia la cima de la secuencia, a partir de los 10 cm (78 cal AP, 1870 d.C.) (Figura 6).

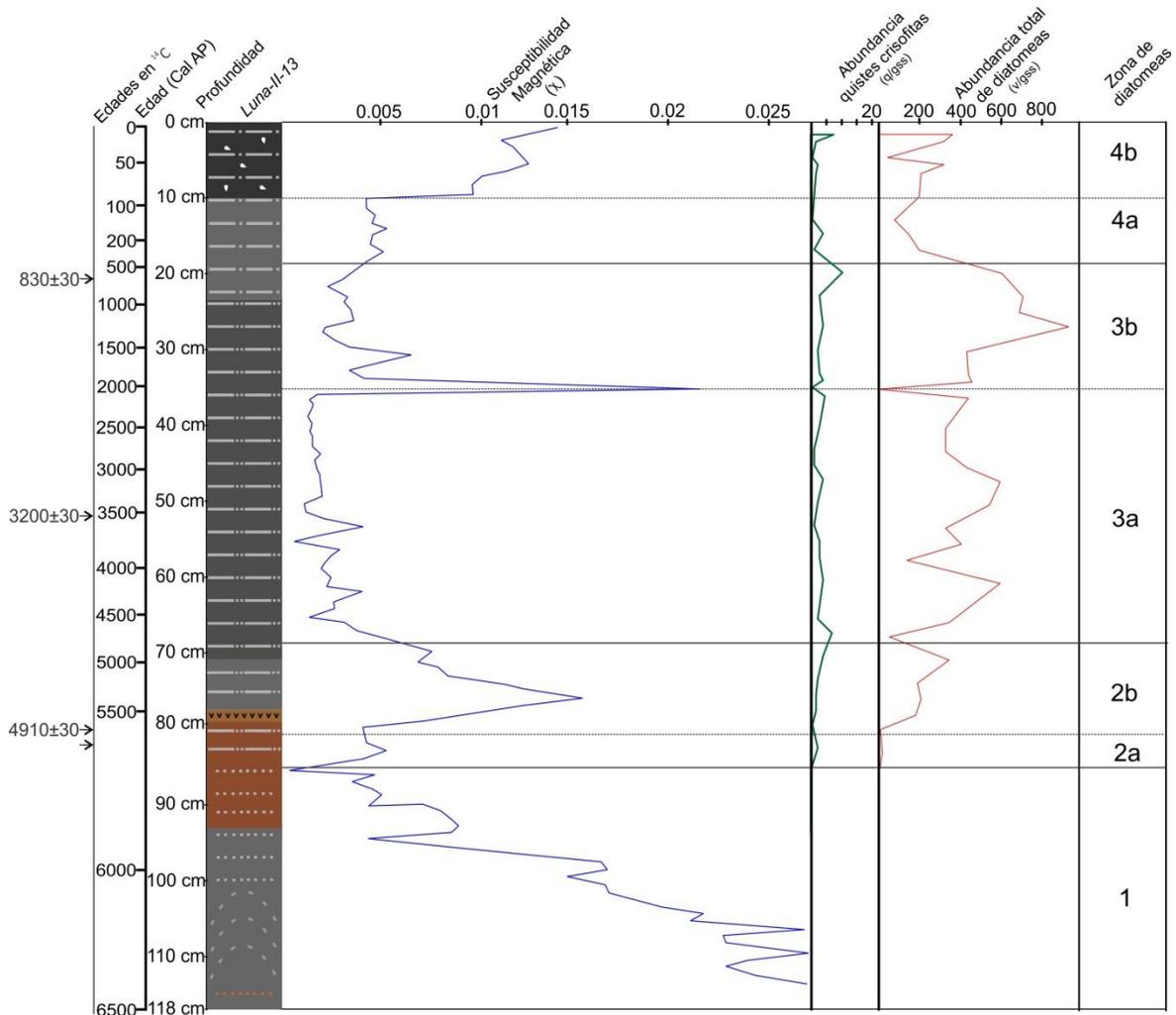


Figura 6. Fechamientos de radiocarbono en ^{14}C , edades calibradas en fechas AP, estratigrafía del registro sedimentario, resultados de susceptibilidad magnética dependiente de la masa (χ), abundancia total de quistes de crisofíceas y abundancia total de diatomeas a lo largo del núcleo *luna-II-13*, lago La Luna, Nevado de Toluca, México.

Taxonomía de Diatomeas

En el análisis del núcleo *Luna-II-13* fueron identificados un total de 39 taxones de diatomeas, de los cuales 13 especies tuvieron abundancias mayores al >5%. Las descripciones de estas especies, incluidas sus afinidades ecológicas, se presentan a continuación.

Auloseira distans (Ehrenberg) Simonsen, 1979.

Lámina 1:1-3

Sin. *Gaillonella distans* Ehrenberg, 1836.

Sin. *Melosira distans* (Ehrenberg) Kützing, 1844.

Clase: Coscinodiscophyceae

Orden: Aulacoseirales

Familia: Aulacoseiraceae

Género: *Auloseira*

Descripción: Frústulos en forma de cilindro cortos, cadenas con 2 a 3 células estrechamente unidas. Manto con lados paralelos a ligeramente convexos. Espinas conectivas simples, cortas, cónicas y delgadas. Areolas circulares sobre la superficie valvar, las areolas del centro dispuestas irregularmente. En el manto las areolas forman estrías paralelas o ligeramente inclinadas a la derecha; collum corto y anillo (ringleiste) profundo. Relación manto/diámetro <1 (Camburn y Charles, 2000; Denys *et al.*, 2003; Potapova, 2009).

Diámetro 4-20 µm; altura del manto 3.5-8.5 µm; estrías 18-20 en 10 µm; areolas: 20-24 en 10 µm, anillo valvar (Ringleiste) abarcando un 1/3 a 1/2 del diámetro total.

Morfometría en el registro sedimentario *Luna-II-13*: Algunos ejemplares del registro sedimentario se encuentran formando cadenas; en vista valvar: se observaron espinas cortas, y ligeramente visibles alrededor del contorno, con aréolas circulares visibles solamente en algunos ejemplares, el diámetro de la valva es de 4 a 7 µm, con una densidad de aréolas 20 en 10 µm, las características morfométricas que presentan los ejemplares del registro sedimentario concuerdan con las medidas reportadas en la literatura.

Información ambiental: Cosmopolita, acidófila, pH óptimo de 6.1 (rangos de tolerancia 6.0 a 7.9), (Caljon y Cocquyt, 1992; Tremarin *et al.*, 2014; Ginn *et al.*, 2015), prefiere aguas poco mineralizadas, ricas en oxígeno, oligotróficas. (Burns *et al.*, 1997). Hábitat principal en lagos y ríos de agua frías en forma planctónica y frecuentemente bentónica (Foged, 1964; Öberg *et al.*, 2009). Esta especie es abundante en la flora actual del lago El Sol (sobre todo en sedimento litoral) pero

prácticamente ausente en el lago La Luna (Caballero, 1996; Cuna *et al.*, 2013) por lo que su presencia sugiere condiciones de pH similares El Sol, un poco más alto que en La Luna.

Caloneis aerophila Bock, 1963.

Lámina 1: 4-5

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Naviculales

Familia: Naviculaceae

Género: *Caloneis*

Descripción: Valvas isopolares, lineares a linear-lanceolados, ápices redondos a cuneados, márgenes de la valva rectos, ligeramente convexos en ejemplares más pequeñas. Área axial lineal que se amplía en la zona central formando una fascia transversal. Estrías paralelas, Rafe recto filiforme con los nódulos centrales doblados hacia el mismo lado (Krammer y Lange-Bertalot, 1988).

Largo de la valva: 14-25 μm ; ancho de la valva 3-5 μm ; estrías 18-25 en 10 μm .

Morfometría en el registró sedimentario Luna-II-13: Los ejemplares corresponden con lo descrito en la literatura consultada, con tamaños de 13 a 17 μm de largo, 3.5 a 4.5 μm de ancho y una densidad de estrías de 20 a 26 estrías en 10 μm .

Información ambiental: Cosmopolita, circumneutral a acidófila (pH: 4.9-7.6) (Michelutti *et al.*, 2006; Keatley *et al.*, 2008) poco frecuente de encontrar, aerófila, generalmente en lagos de alta montaña, manantiales y pantanos (Wojtal *et al.*, 1999; Linares y Sánchez, 2007) con alto contenido de silicatos y baja conductividad, hábitat en forma bentónica (Bak *et al.*, 2012). Su presencia sugiere condiciones muy bajas de tirante de agua, posiblemente en cuerpos de agua que no son permanentes.

Cavinula pseudoscutiformis (Hustedt) Mann y Stickle 1990.

Lámina 1: 6-7

Sin. *Navicula pseudoscutiformis* (Hustedt) 1930.

Sin. *Navicula scuteloides* var. *minutissima* (Cleve) 1881.

Clase: Bacillariophyta

Orden: Naviculales

Familia: Cavinulaceae

Género: *Cavinula*

Descripción: Perímetro valvar subcircular. Rafe recto, filiforme. Área axial estrecha y levemente fusiforme (un poco más ancha en la parte central adelgazando hacia los ápices). Estrías claramente

punteadas y marcadamente radiales, algunas estrías centrales alternadamente, pueden ser más cortas y no llegar hasta la zona axial, la densidad de estrías aumenta hacia los ápices (Krammer y Lange-Bertalot, 1988; Otu y Spaulding, 2011).

Ancho de la valva 3 a 17 μm , largo de la valva 35.5 a 25 μm , estrías 16-26 en 10 μm , areolas 16-24 (30) en 10 μm .

Morfometría en el registró sedimentario *Luna-II-13*: Los ejemplares observados se ajustan totalmente a la descripción de las especie, los tamaños registrados fueron 6 a 16 μm de largo, 6 a 14 μm de ancho, 20 a 24 estrías en 10 μm .

Información ambiental: Cosmopolita, circumneutral a acidófila (Briner *et al.*, 2006), pH óptimo 6.5 a 7.1 (pH reportado: 6.2 a 8.4) (Cremer, y Wagner, 2003; Van de Vijver *et al.*, 2004; Rühland y Smol, 2005; Flower *et al.*, 2012; Mogna *et al.*, 2015), β -mesosaprobica, oligo a mesotrofica, hábitat principal en lagos, rara vez en ríos, en forma bentónica (Robinson, 2004; Antoniadis *et al.*, 2009; Cocquyt *et al.*, 2013b; Cvetkoska *et al.*, 2014) se considera una especie indicadora de calidad del agua. Esta especie es abundante en la flora moderna del lago El Sol, pero prácticamente ausente en La Luna (Caballero, 1996; Cuna *et al.*, 2013) por lo que su presencia sugiere condiciones de pH similares a El Sol, un poco más alto que en la Luna.

Chamaepinnularia sp. Lange-Bertalot y Metzeltin, 1996.

Lámina 1: 8-10 y Figura 9

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Naviculales

Familia: Naviculales *incertae sedis*

Género: *Chamaepinnularia*

Descripción del género: Frústulos solitarios las valvas del genero *Chamaepinnularia* son lineales, casi lineal, u onduladas; valvas pequeñas, generalmente menos de 25 μm de longitud y de 2 a 3.5 μm de ancho. Las estrías se componen de areolas sencillas, similar a la cámara, con aberturas exteriores cubiertas por vela. Interrumpida por una banda de sílice que corre a lo largo de la valva, cercana a la unión de la cara valvar con el manto. Internamente, las aberturas de las areolas se dividen con placas internas de sílice. Existen 5 a 7 estrías cortas en los márgenes polares de las valvas. El rafe puede ser simple o complejo en estructura, como en *Pinnularia* o *Navicula*. Externamente, las fisuras del rafe distales tienen forma de gancho y terminan internamente con una pequeña helictoglossa. Los extremos proximales del rafe externos son discretos y doblan hacia el mismo lado (Cantonati y Lang-Bertalot, 2009; Spaulding y Edlund, 2009a).

Son valvas de crecimiento individual. Muchas de las especies son aerófilas, presentes en hábitats húmedos sobre musgos y líquenes (Wetzel *et al.*, 2002). El género incluye una serie de especies pequeñas separadas de los géneros *Pinnularia* y *Navicula*.

Morfometría en el registró sedimentario Luna-II-13: Las muestras del registro sedimentario con elevada abundancia de la especie que designamos como *Chamaepinnularia* sp., fueron observadas bajo microscopia electrónica de barrido (SEM) en Instituto de Ecología de Xalapa INECOL. (Figura. 9), con el objetivo de confirmar el género debido a que por su tamaño tan pequeño su identificación al microscopio de luz no fue posible. Los ejemplares observados tienen todas las características del género (Figura. 9 A, C, D). Sus valvas son pequeñas (valvas de 13 a 15 μm de largo y 2.5 a 3 μm de ancho), isopolares, lineales, algunas veces ligeramente estrechadas en la zona central, con los ápices redondeados. Área axial es amplia y recta; área central diferenciable del área axial, ovalada y sus estrías están formadas por areolas. Rafe recto, nódulos centrales que se curvan hacia el mismo lado (Figura. 9D); fisuras distales terminan ligeramente en curva o en forma de gancho (Figura. 9C); internamente rafe recto con nódulos centrales opuestos en forma de L y fisuras distales terminando en una pequeña helictoglossa (Figura. 9B). Las estrías son paralelas de 28 a 30 en 10 μm e ininterrumpidas en el margen valvar por una banda de sílice; las areolas son sencillas, y a pesar de que los ejemplares observados no estuvieron bien preservados, se infiere que estuvieron cubiertas por un velo a partir de la forma dentada que tienen sus imágenes en microscopia electrónica de barrido (Figura. 9A, C, D). Estrías cortas en los ápices de las valvas de 5 a 7 en cada polo.

Encyonema perpusillum (Cleve-Euler) Mann, 1990.

Lámina 1: 11-13

Sin. *Cymbella perpusilla* (Cleve) 1985.

Sin. *Cymbella bipartita*, (Mayer) 1916.

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Cymbellales

Familia: Gomphonemataceae

Género: *Encyonema*

Descripción: Valvas moderadamente dorsiventrales, margen dorsal convexo, margen ventral ligeramente convexo a casi recto, ápices redondeados a rostrados, zona axial lineal y estrecha ampliándose ligeramente en la zona central, rafe filiforme, extremos distales en forma de hoz flexionados ventralmente, estigmoide en la región dorsal media, difícil de apreciar en microscopia de luz. Estrías paralelas a levemente radiales en la zona central, paralelas a levemente convergentes en la zona distal. Areolas de las estrías apenas visibles al microscopio de luz.

Largo de la valva: 10-30 μm ; ancho de la valva: 3-5 μm ; densidad de estrías ventrales: 14-16 en 10 μm ; densidad de estrías dorsales 10-13 en 10 μm , densidad de puntos 35-45 en 10 μm (Krammer y Lange-Bertalot, 1988; Krammer, 1997).

Morfometría en el registró sedimentario *Luna-II-13*: Los ejemplares se ajustan a los tamaños en la literatura citada registrando un intervalo de 18 a 27 μm de largo, ligeramente superior en el ancho con valores de 4 a 5.5 μm así como una densidad de estrías mayor 15 a 18 en 10 μm en el lado dorsal, densidad de estrías en el lado ventral 15 a 16 en 10 μm .

Información ambiental: Acidófila, con mejor desarrollo a pH debajo de 7 (pH reportado 4.3-7.8), (Wetzel *et al.*, 2002; Salomoni y Torgan, 2008) ultra-oligotróficos a oligotróficos, β -mesosaprobico, hábitat principal en arroyos, ríos y lagos poco mineralizados, en forma bentónica (Oliveira *et al.*, 2002; Cremer y Wagner, 2003; Gesierich, y Rott, 2004; Ramírez, 2008; Taurai *et al.*, 2014), especie indicadora de calidad ambiental, reportada para diversos lagos de alta montaña (Bak *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014). Es una especie abundante (>10%) en la flora moderna del lago La Luna y con abundancias bajas (<10%) en el lago El Sol. (Caballero, 1996; Cuna *et al.*, 2013). Su presencia se considera indicadora de valores de pH <6, característicos del lago La Luna.

Navicula NTA

Lámina 1: 19-21

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Naviculales

Familia: Naviculaceae

Descripción: Valvas estrechamente elípticas, ápice corto rostrado a capitados, zona axial estrecha, área central indiferenciada del resto de la valva. Valva con una largo entre los 19 a 25 μm (comúnmente cerca de los 20 μm) y un ancho entre 4.5 a 5.6 μm . Rafe recto filiforme con terminales rectas y terminales polares inclinándose hacia el mismo lado. Estrías paralelas a ligeramente radiales en la zona central, ligeramente convergentes hacia los extremos, claramente distinguibles en el microscopio óptico, con una densidad que varía entre los 16 a 19 en 10 μm . Bajo el microscopio electrónico de barrido (SEM) los puntos de las estrías están alargados en forma de ranuras, su densidad es de 18-20 en 10 μm (Caballero, 1996).

Morfometría en el registró sedimentario *Luna-II-13*: Los ejemplares se ajustan con lo descrito reportado por Caballero, (1996) con tamaños de 21 a 24 μm de largo, 4.5 a 4.9 μm de ancho y con una densidad de estrías entre 18 a 20 en 10 μm .

Información ambiental: de acuerdo a lo reportado por caballero (1996) al ser una probable especie endémica y con su actual distribución únicamente en el lago la Luna, responde a las características físicoquímicas del lago clasificando a esta especie como: acidofila, con mejor desarrollo a pH de abajo de 7, de aguas oligotróficas poco mineralizados, bentónica. Es una especie abundante en el lago la luna desde etapas tempranas del registro del lago.

Pinnularia borealis Ehrenberg, 1843.

Lámina 1: 14-15

Sin. *Navicula borealis* (Ehrenberg) Kützing, 1844.

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Naviculales

Familia: Pinnulariaceae

Género: *Pinnularia*

Descripción: Valvas isopolares, lineales a lineales elípticas, ápices obtusos anchos, redondeados a cuneados. Rafe filiforme ligeramente lateral, extremos proximales curvados hacia la misma dirección, poros centrales grandes, extremos distales en forma de hoz. Área axial estrecha, área central redonda con 1 o 2 estrías más cortas (o ausentes), no totalmente opuesta. Las estrías son gruesas y de baja densidad, moderadamente radiales en el centro a moderadamente convergentes en los ápices.

Largo de la valva 24-110 μm ; ancho de la valva 5-18 μm ; 4-6 en 10 μm (Krammer y Lange-Bertalot, 1988; Cabała y Rahmonov, 2004; Bahls, 2014a).

Morfometría en el registro sedimentario Luna-II-13: Los ejemplares se ajustan con lo descrito en la literatura, con tamaños de 23 a 50 μm de largo, 8 a 11 μm de ancho y con una densidad de estrías entre 3 a 4 en 10 μm .

Información ambiental: Cosmopolita, indiferente al pH (pH: 5.1 hasta 8.9) (Van Kerckvoorde *et al.*, 2000; Maidana *et al.*, 2009), preferentemente en aguas frías ligeramente alcalinas, oligotróficas; oligohalobias, bien oxigenados (Souffreau *et al.*, 2013). Hábitat principal en lagos, pequeños arroyos y charcos en forma bentónica, planctónica, aerófila y epifítica (Van de Vijver y Beyens, 1997; Lukesova y Hoffmann, 1996; Horrocks *et al.*, 2002; Téllez y Schillizzi, 2002; Van de Vijver *et al.*, 2004; Van de Vijver, 2008; Bak *et al.*, 2012; Marcos *et al.*, 2014). Su presencia es indicadora de cuerpos de aguas someros, con pH ligeramente ácidos a circumneutrales y bajos nutrientes.

Pinnularia microstauron (Ehrenberg) Cleve, 1891.

Lámina 1: 16-18

Sin. *Navicula microstauron* (Ehrenberg) Héribaud, 1903.

Sin. *Stauroptera microstauron* (Ehrenberg) 1843.

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Naviculales

Familia: Pinnulariaceae

Género: *Pinnularia*

Descripción: Valvas isopolares, lineales a lineales lanceoladas, ápices redondeados a ligeramente rostrados. Área axial estrecha. Área central de forma rómbica constituye una fascia transversal. Estrías radiales en el centro, cortas en ambos lados y convergentes en los extremos. Rafé filiforme, extremos centrales ligeramente expandidos y curvados hacia el mismo lado, extremos distales en forma de hoz.

Largo de la valva 20-100 μm ; ancho de la valva 7-15 μm ; estrías 9-11 en 10 μm (Krammer y Lange-Bertalot, 1988; Bahls, 2014b).

La variedad *Pinnularia microstauron* var. *nonfasciata* se compone de un área central más redondeada o ausente, 20-60 μm de largo 8-11 μm de ancho, de 11-13 estrías en 10 μm (Krammer, 2000).

Morfometría en el registro sedimentario Luna-II-13: Los ejemplares de *Pinnularia microstauron* y *Pinnularia microstauron* var. *nonfasciata* presentes en el registro sedimentario se ajustan a los rangos mínimos tanto en el largo de la valva que es entre 28 a 38 μm así como el ancho de las mismas con un rango entre, 5.5 a 7 μm y una densidad de estrías 7 a 9 en 10 μm que ligeramente salen del rango establecido.

Información Ambiental: Cosmopolita, ambientes ligeramente ácidos (pH: 6.0-8.6) preferentemente en aguas, oligotróficas y mesotróficas; oligohalobia (Sabater y Ramón-Roca, 1992; Gaiser y Johansen 2000; Gold *et al.*, 2002; Unrein *et al.*, 2005; Linares y Sánchez, 2007; Long *et al.*, 2010; Quintela *et al.*, 2013); hábitat principal en lagos, pantanos, rara vez en ríos. En aguas ricas en oxígeno con baja concentración iónica, páramos fríos y de altura, en forma bentónica y plantónica (Fulford-Smith y Sikes, 1996; Zong y Horton, 1998; Roberts y McMinn 1999; Saros *et al.*, 2000; Oliva-Martínez *et al.*, 2005). *Pinnularia microstauron* es una de las especies más comunes con un gran complejo de variedades y una de las especies ampliamente distribuidas del género *Pinnularia*. Su presencia se considera indicadora de pH > 6.

Pinnularia aff. viridis (Nitzsch) Ehrenberg, 1843.

Lámina 2: 26-28

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Naviculales

Familia: Pinnulariaceae

Género: *Pinnularia*

Descripción: Valvas isopolares, lienares a lineares-elípticas, ápices ampliamente redondeados, no capitados, zona axial estrecha cerca de los polos ampliándose gradualmente, área central redonda o elíptica. Rafe filiforme, sinuoso o complejo, terminaciones distales en forma de signo de interrogación y terminaciones proximales redondas, gruesas e inclinadas ligeramente. Estrías levemente radiales en el centro y convergentes en los ápices, formadas por alveolos cutas aperturas producen una banda transversal hialina en el margen de la valva.

Largo de la valva: 50-170 μm , ancho de la valva: 10-30 μm ; estrías 6-12 en 10 μm (Krammer y Lange-Bertalot, 1986; Krammer, 2000; Spaulding y Edlund, 2009b).

Morfometría en el registro sedimentario *Luna II-13*: Los ejemplares en el registro sedimentario presentan de 40 a 80 μm de largo; 9 a 14 μm de ancho y 12 a 14 estrías en 10 μm , que de acuerdo Krammer y Lange-Bertalot, 1986, las medidas en el largo entran dentro del rango, y las medidas en el ancho son inferiores y en algunos ejemplares se acercan al rango establecido, sin embargo las estrías son más densas en los ejemplares del registro sedimentario en comparación con lo que establece la literatura consultada. Además se difiere en la posición de los nódulos centrales del rafe que son rectos según la literatura, mientras que en los ejemplares del registro *Luna-II-13*, inclinan hacia el mismo lado; podría tratarse de un morfotipo más de esta especie.

Información ambiental: Solitarias, cosmopolita; indiferente al pH: (4.2-9.0 óptimo en 5.6-6) (Lowe, 1974); en aguas oligotróficas; oligosaprobica a β -mesosaprobico (Schmid, 2003, Ciniglia *et al.*, 2007 Souffreau *et al.*, 2013) hábitat principal en lagos en forma bentónica, en aguas ricas en oxígeno con baja a media concentración iónica (Novelo, 2012) esta especie de caracteriza por su gran número de morfotipos descritos en la literatura (Kramer, 2000).

Psammothidium helveticum (Hustedt) Bukhtiyarova y Round, 1996.

Lámina 1: 22-23

Sin. *Achnanthes helvetica* (Hustedt) 1933.

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Cocconeidales

Familia: Achnanthidiaceae

Género: *Psammothidium*

Descripción: Valvas elípticas-lineares; ápices redondeados. Valva con rafe: rafe lineal con fisuras terminales largas y curvas hacia los lados opuestos, con una zona central que se extiende hasta el margen de la valva. Valva sin rafe: área axial lineal estrecha con una amplia zona central redondeada, hexagonal o en forma de diamante. Estrías radiales en ambas valvas.

Largo de la valva 7-28 μm ; ancho de la valva 7-7.5 μm ; estrías 23-28 en 10 μm (Krammer y Lange-Bertalot, 1991; Potapova, 2010; Bukhtiyarova y Stanislavskaya, 2013)

Morfometría en el registro sedimentario Luna II-13: Los ejemplares observados presentan una proporción menor con respecto al ancho de la valva, con un largo entre los 5 a 7 μm de ancho, mientras que el largo entre 9 a 12 μm de largo y una densidad de estrías de 26 a 28 en 10 μm se ajustan totalmente a la descripción citada en la literatura.

Información ambiental: Cosmopolita, circumneutral, pero con mejor desarrollo en pH ligeramente ácidos, (pH: 6.0-7.2) (Flower, 2005); en aguas frías con baja concentración iónica; oligotrófico; hábitat principal en pequeños arroyos y lagos en forma bentónica (Hirst *et al.*, 2002; Manoylov, 2007; Enache *et al.*, 2013), actualmente es una especie abundante (>10%) en el lago La Luna (Caballero 1996; Cuna *et al.*, 2013) y rara en El Sol.

Psammothidium levanderi (Hustedt) Bukhtiyarova y Round, 1996.

Lámina 1: 24-25

Sin. *Achnanthes levanderi* (Hustedt) 1933.

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Cocconeidales

Familia: Achnanthidiaceae

Género: *Psammothidium*

Descripción: Valvas elípticas a elípticas-lineares; ápices ampliamente redondeados. Valva con rafe: rafe recto sin fisuras terminales con una pequeña zona central, asimétrica. Valva sin rafe: presenta una superficie axial de forma romboidal, el área central no se diferencia de la zona axial. Estrías radiadas ligeramente en el centro y fuertemente en los ápices de ambas valvas

Largo de la valva 6-11 μm ; ancho de la valva 4-5 μm ; estrías 22-28 en 10 μm (Krammer y Lange-Bertalot, 1991; Potapova, 2010).

Morfometría en el registro sedimentario Luna-II-13: Los ejemplares corresponden con o descrito en la literatura consultada, con tamaños de 7 a 8.5 μm de largo, 3.5 a 4.5 μm de ancho y una densidad de estrías de entre 22 a 25 estrías en 10 μm .

Información ambiental: Distribuidas en zonas alpinas del Hemisferio Norte. Circumneutral a moderadamente acidas, (pH 6.5-7.5) (Sherwood y Sheath, 1999; Andren y Jarlman, 2008; Chen *et al.*, 2008; Falasco y Bon, 2011; McLaughlin, 2014) aguas con baja concentración iónica; oligotróficas a ultra-oligotróficas, hábitat principalmente en lagos en forma bentónica. (Lavoie *et al.*, 2006; Sickman *et al.*, 2013; Law *et al.*, 2015; Saulnier-Talbot *et al.*, 2015) Especie indicadora de buena calidad de agua, actualmente forman parte de la flora tanto del lago La Luna como del lago El Sol (Caballero 1996; Cuna *et al.*, 2013).

Stenopterobia delicatissima (Lewis) Brebisson ex Van Heurck, 1896.

Lámina 2: 29-30

Sin. *Surirella delicatissima* (Lewis) 1896.

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Surirellales

Familia: Surirellaceae

Género: *Stenopterobia*

Descripción: Valvas isopolares delgadas, lanceoladas con ápices prolongados débilmente silisificadas. Presencia de canales alares cortos y agudos. Estrías transversales ligeramente visibles, carina marginales delgada, fibulas delgadas transapicales de 6 a 7 en 10 μm . Rafe no visible en microscopia de luz, esta especie se caracteriza por su difícil observación debido a la poca silisificación de esta especie. (Machuca *et al.*, 2003; Siver y Hamilton, 2005; Siver y Camfield, 2007)

Largo de la valva: 30-100 μm ; ancho de la valva: 3.5-9 μm ; estrías: 18-27 en 10 μm (Krammer y Lange-Bertalot, 1988).

Morfometría en el registro sedimentario Luna-II-13: Los ejemplares corresponden a lo descrito en la literatura a consultada con un largo de 30 a 35 μm ; un ancho de 4 a 6 μm y una densidad de estrías aproximadamente entre 22 a 25 en 10 μm , difícil de observar bajo el microscopio de luz debido a la poca salificación de esta especie.

Información ambiental: Cosmopolita, circumneutral (pH: 6.0-7.2), (Guilizzoni *et al.*, 1996; Zampella *et al.*, 2007) poco frecuente en lagos oligotróficos, generalmente en arroyos y manantiales de alta montaña con alto contenido de silicatos y baja conductividad, se presenta también en forma

aislada en pantanos ácidos en forma bentónica (Sabater y Ramon-Roca 1992; Ziller y Economu-Amilli, 1998; Lynn, 2003; Dunck *et al.*, 2012), excelente indicador de las condiciones ecológicas del agua (Bak *et al.*, 2012). Esta especie está presente en el lago La Luna y rara en El Sol (Caballero, 1996).

Surirella linearis Smith, 1853.

Lámina 2: 31

Sin. *Suriraya linearis* (Smith) Pfitzer, 1871.

Clase: Bacillariophyceae

Orden: Surirellales

Familia: Surirellaceae

Género: *Surirella*

Descripción: Valvas isopolares a ligeramente heteropolares, linear-lanceoladas o elípticas. Ápices cuneados a redondos, márgenes cóncavos, en el centro presenta ondulaciones asociadas con la formación de ventanas bajo el canal del rafe. Tiene un canal sin ondulaciones plano a lo largo de la línea media de la valva.

Largo de la valva: 20-120 μm ; ancho de la valva: 9-25 μm ; fibulas 6-8 en 10 μm ; estrías: 20-22 en 10 μm (Krammer y Lange-Bertalot, 1988).

Morfometría en el registro sedimentario Luna-II-13: Los ejemplares se ajustan a lo descrito a la literatura consultada con estrías poco visibles, presenta un largo de 35 a 100 μm ; un ancho de 19 a 22 μm con una densidad de fibulas gruesas y evidentes de 6 a 7 en 10 μm .

Información ambiental: Cosmopolita. Indiferente al pH (Rangos de pH: 2.9-8.7), (Vélez *et al.*, 2005; Bramburger *et al.*, 2006; Solak *et al.*, 2012; Cocquyt *et al.*, 2013a) oligotróficos, mesotróficos, eutróficos, oligohalobio, oligosaprobico a β -mesosaprobico,(Whitmore, 1989; Albay y Akçaalan, 2008). Hábitat principalmente lagos, ríos; en forma bentónica, planctónica y epifítica (Caljon y Cocquyt, 1992; Cocquyt y Jahn, 2007; Bak *et al.*, 2012; Novelo, 2012) esta especie ha sido registrada con bajas abundancias (<3%) tanto en como en el lago El Sol reportados (Caballero, 1996).

Lámina 1

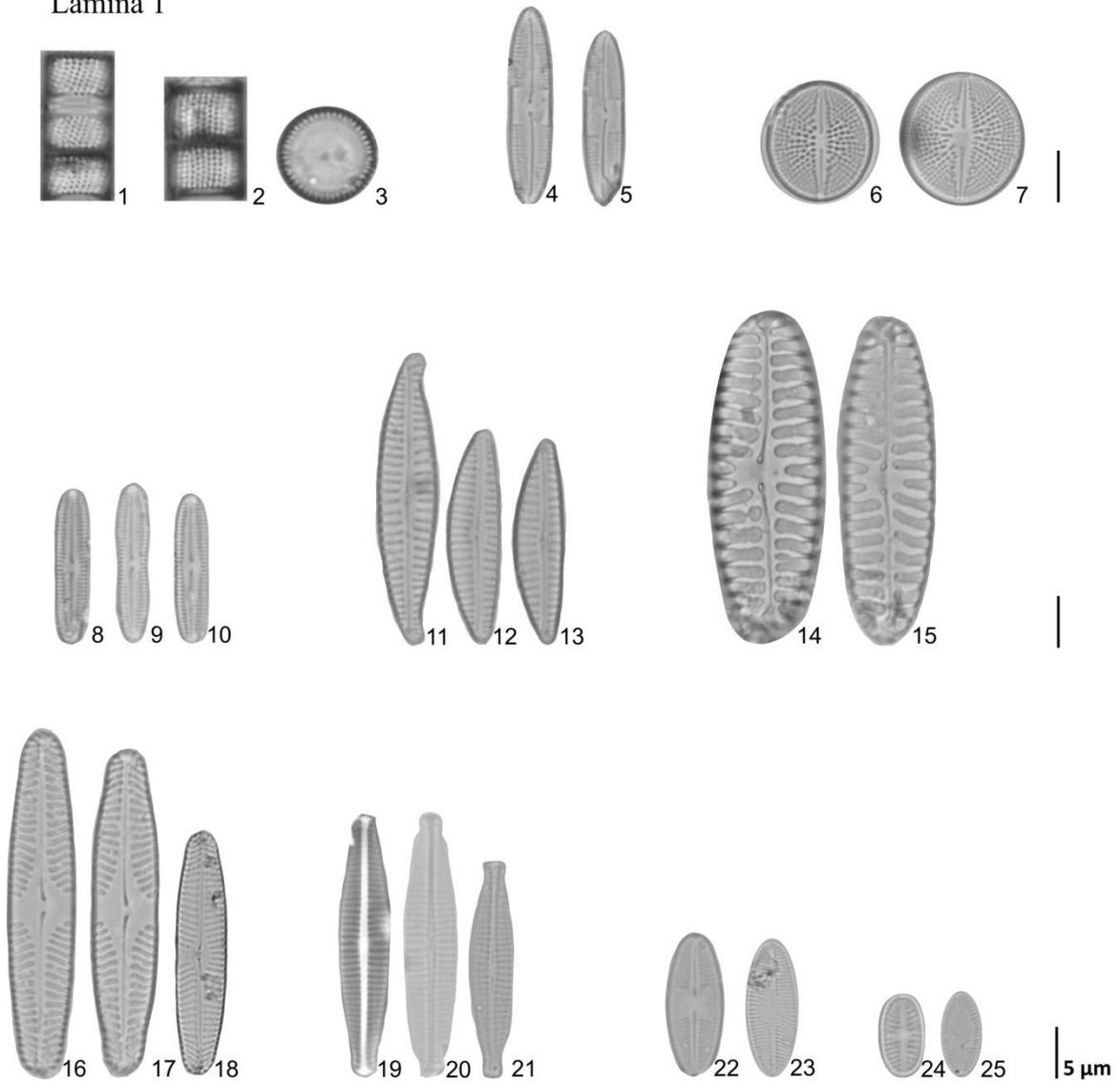


Lámina 1: 1,2) *Aulacoseira distans*, vista cingular 3) *Aulacoseira distans*, vista valvar; 4,5) *Caloneis aerophila*; 6,7) *Cavinula pseudoscutiformis*; 8,9,10) *Chamaepinnularia* sp; 11,12,13) *Encyonema perpusillum*; 14, 15) *Pinnularia borealis*; 16,17) *Pinnularia microstauron*; 18) *Pinnularia microstauron* var. *nonfasciata* 19,20,21) *Navicula* NTA; 22) *Psammothidium helveticum* valva con rafe; 23) *Psammothidium helveticum* valva sin rafe; 24) *Psammothidium levanderi* valva con rafe; 25) *Psammothidium levanderi* valva sin rafe. Todas las barras de la escala son igual a 5 µm.

Lámina 2

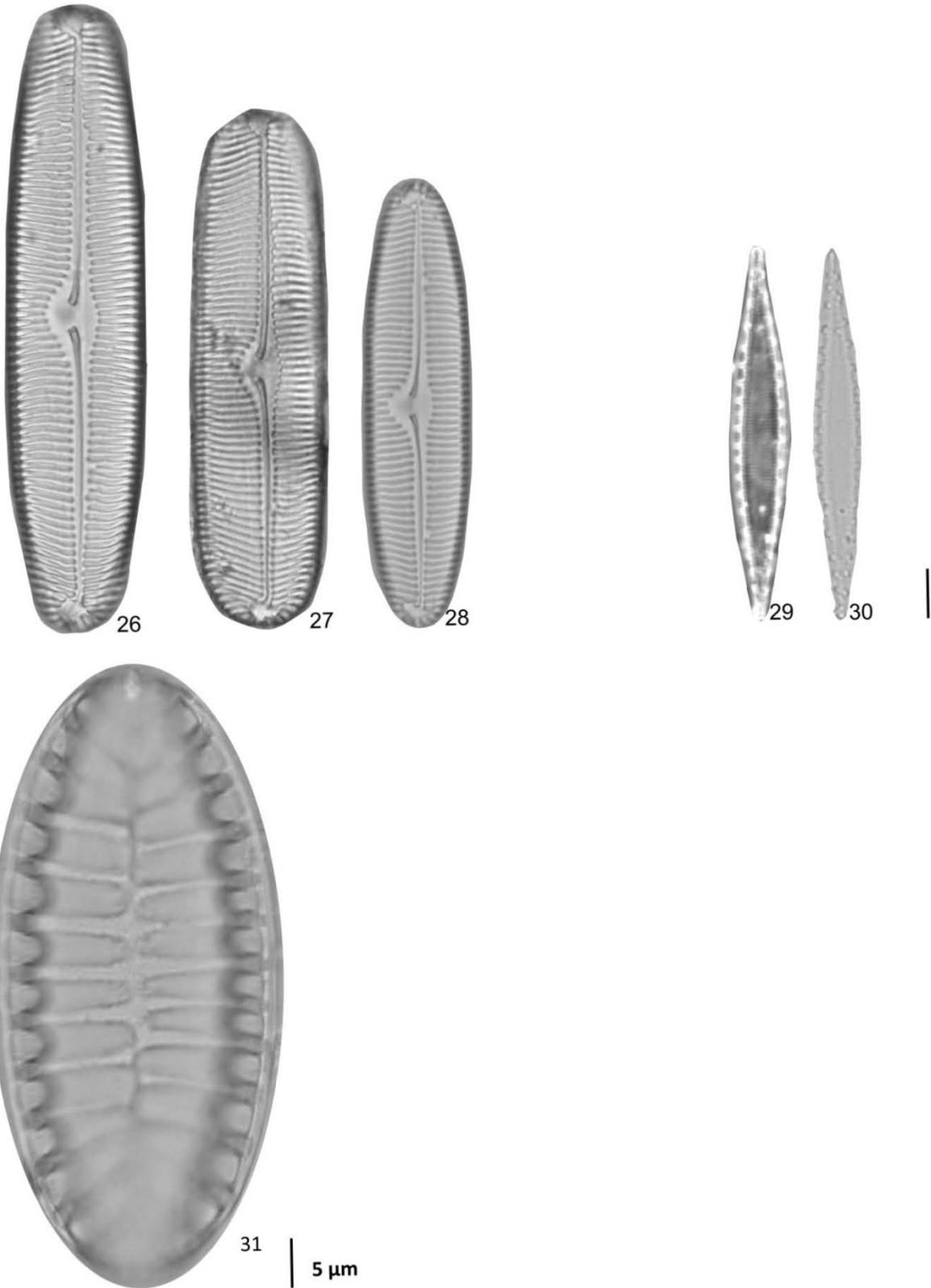


Lámina 2: 26, 27, 28) *Pinnularia* aff. *viridis*; 29, 30) *Stenopterobia delicatissima*; 31) *Surirella linearis*. Todas las barras de la escala son igual a 5 μm.

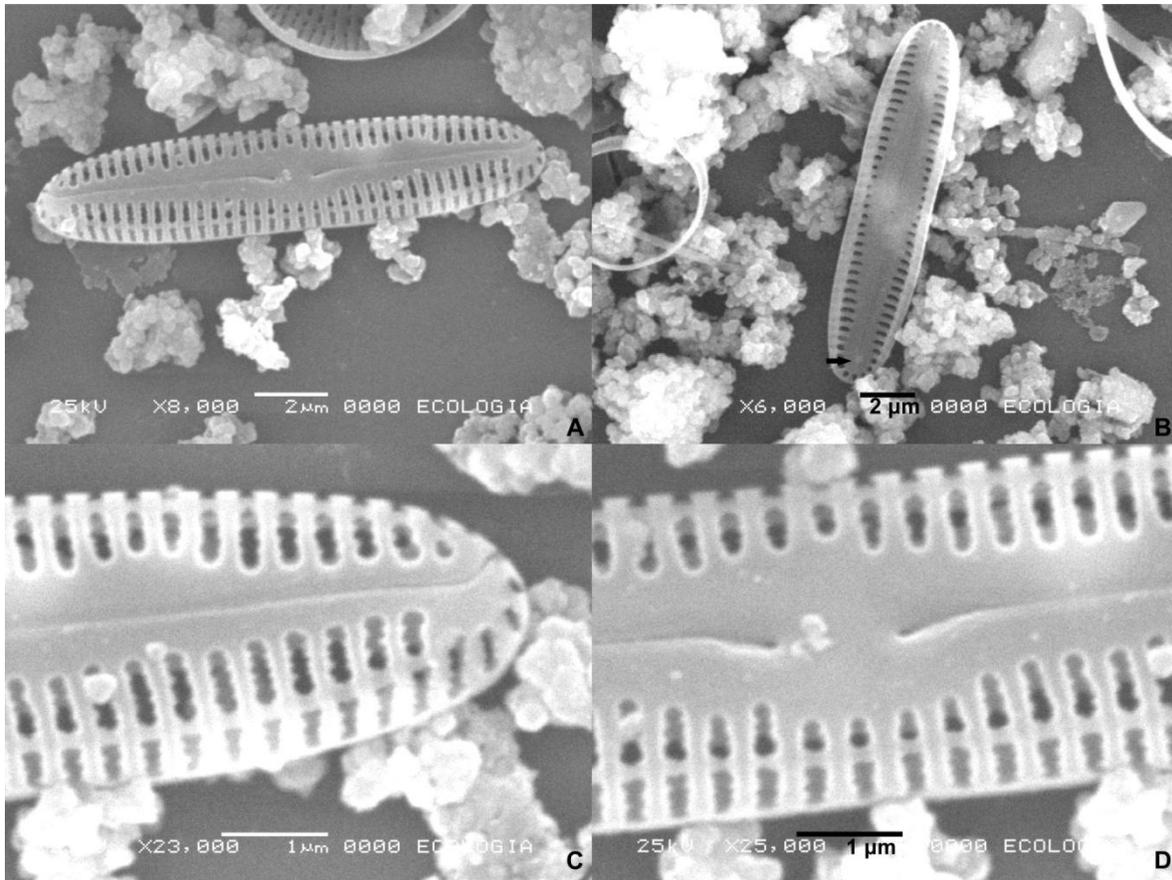


Figura 7. Vista en SEM de *Chamaepinnulaira* sp. A) Cara externa de la valva, B) cara interna de la valva, C) ampliación del ápice con enfoque en el rafe terminal en forma de gancho D) ampliación de la zona central.

Estratigrafía de Diatomeas

Los cambios en las abundancias relativas de estas 13 especies fueron analizados mediante la subrutina CONISS del programa Tilia (Grimm, 2004). Los resultados de este análisis permiten identificar 4 zonas y un total de 7 etapas (zonas y subzonas) con conjuntos de diatomeas característicos (Figura 9) que indican cambios en las condiciones del lago.

Para complementar la interpretación de los datos de diatomeas, se presentan los resultados del análisis de correspondencia sin tendencia (DCA). Los Eingevalores indican que el eje 1 explica 50% de la dispersión de los datos, mientras que el eje 2 un 24% y el eje 3 solo el 11% (Tabla 4).

Tabla 4. Eigenvalores de los ejes derivados del DCA.

Eje	Eigenvalores
1	0.4947
2	0.2379
3	0.1081
4	0.0630

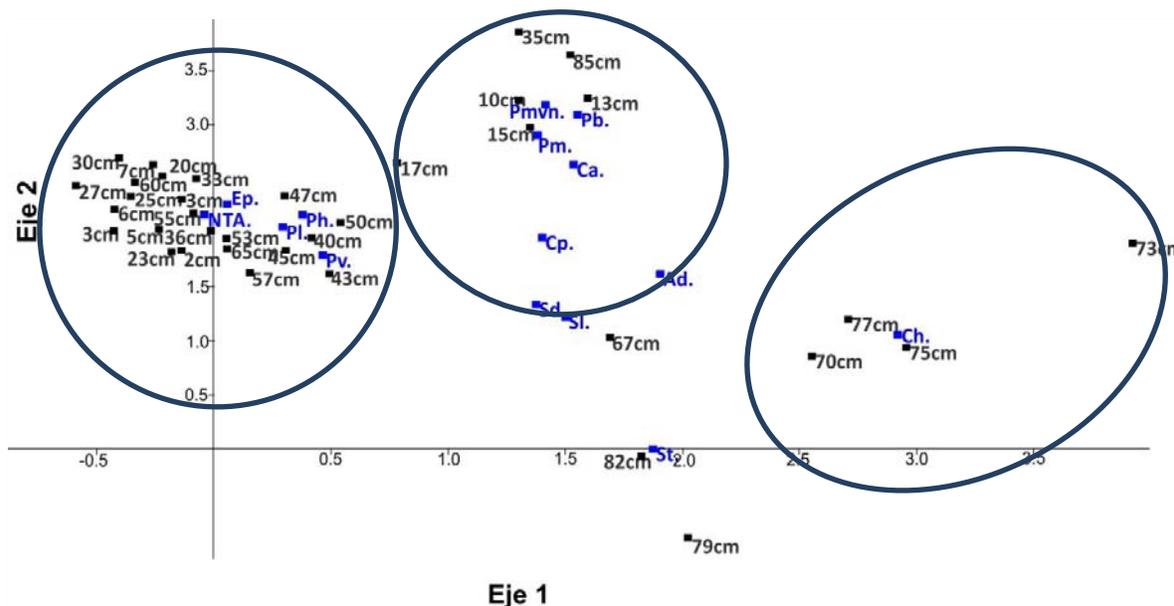


Figura 8. Análisis de Correspondencia sin Tendencia de diatomeas del registro sedimentario *Luna-II-13* con respecto a las especies en concentración mayor al 5%. Ad. *Aulacoseria distans*; Ca. *Caloneis aerophila*; Cp. *Cavinula pseudocutiformis*; Ch. *Chamaepinnularia* sp.; Ep. *Encyonema perpusillum*; NTA. *Navicula* NTA; Pb. *Pinnularia borealis*; Pm. *Pinnularia microstauron* Pm Vn *Pinnularia microstauron* Var. *nonfasciata*; Pl. *Psammothidium levanderi*; Ph. *Psammothidium helveticum*; Sl. *Surirella linearis*; Sd. *Stenopterobia delicatissima*; Pv. *Pinnularia* aff. *viridis*.

La figura 8 muestra los puntajes en los ejes 1 y 2 de las especies diatomeas y las muestras analizadas. En este diagrama es posible identificar asociaciones de diatomeas que existen a lo largo de la secuencia sedimentaria *Luna-II-13*. Se observa que la especie con el mayor puntaje en el eje 1 es *Chamaepinnularia* sp., asociada con las muestras 77 a 70 cm (subzona 2b). Esta especie se considera como indicadora de ambientes oligotróficos, aerófilos por lo que su presencia indica ambientes con tirantes de agua muy someros.

Con valores intermedios en el eje 1 se observa el conjunto de especies integrado por *Pinnularia borealis*, *Pinnularia microstauron*, *Pinnularia microstauron* var. *nonfasciata* y *Cavinula pseudocutiformis* que distingue a las muestras 17 a 10 cm (subzona 4a). La ecología de estas especies sugiere que este conjunto indica un ambiente de pH circumneutral a levemente ácido, en cuerpos de agua someros. En esta zona del diagrama

también se ubica *Caloneis aerophila*, que domina en la parte basal del registro. Esta especie es de ambientes aerófilos de alta montaña y su presencia se considera indicadora de ambientes muy someros, o inclusive de suelos o sedimentos húmedos.

Finalmente, en los valores bajos del eje 1 se identifica el conjunto dominado por *Encyonema perpusillum*, acompañada por *Psammothidium helveticum* y *Navicula* NTA que está presente a lo largo de la mayor parte del registro (subzonas 3a, 3b y 4b), estas especies acidófilas, bentónicas forman parte del conjunto de diatomeas que domina actualmente en el lago La Luna, por lo que se considera indicador de las propiedades limnológicas actuales del lago, con $\text{pH} < 6$ y condiciones de ultraoligotrofia.

Las zonas en las que se divide el registro son:

Zona 1: 118-85 cm (6,500-5,700 cal AP), es la parte inferior del registro sedimentario, es la base del núcleo y no hay diatomeas salvo algunas valvas aisladas de las especies aerofilas de suelos húmedos *Pinnularia borealis* y *Caloneis aerophila* entre 90 y 85 cm; correlaciona con los valores de susceptibilidad magnética más altos del registro.

Zona 2: 85-66 cm (5,700-4,500 cal AP), la especie característica es *Surirella linearis*, se dividen en 2 subzonas que se encuentran separadas por la presencia de la tefra de 79-78 cm.

Subzona 2a: 85-79 cm (5,700-5,600 cal AP), esta zona presenta valores bajos de susceptibilidad magnética y muy bajos en la concentración total de diatomeas ($< 20 \times 10^6$ v/gss) y una dominancia que alterna entre *Pinnularia microstauron*, y *Pinnularia borealis* hacia la base de la zona y *Surirella linearis* hacia la cima. Entre las especies con abundancia relativamente bajas destaca *Caloneis aerophila*. Estas especies indican ambientes someros, circumneutrales a levemente ácidos. La susceptibilidad magnética disminuye en esta zona.

Subzona 2b: 79-66 cm (5,600-4,500 cal AP), presenta valores altos de susceptibilidad magnética y una concentración total de diatomeas de baja a intermedia (50 a 350×10^6 v/gss), el conjunto de diatomeas característico de esta subzona está formado por *Surirella linearis*, *Chamaepinnularia* sp., *Aulacoseira distans* y *Stenoperonia delicatissima* con un máximo de *Cavinula pseudocutiformis*

hacia la base de la subzona. Estas especies indican ambientes someros, circumneutrales. Esta subzona se caracteriza por presentar la mayor riqueza de especies en toda la secuencia sedimentaria (S=14 especies en promedio por muestra). La susceptibilidad magnética muestra un marcado incremento asociado con la presencia de la tefra a los 79 cm y va gradualmente disminuyendo hacia la cima de la subzona.

Zona 3: 66-18 cm (4,500-500 cal AP), la principal característica de esa zona es la dominancia de *Encyonema perpusillum*, la especie dominante en el lago actualmente y cuya dominancia sugiere la presencia de un lago somero, ultraoligorófico y pH < 6 La concentración total de diatomeas es intermedia (>300x10⁶ v/gss) a alta (690x10⁶ v/gss), salvo por la muestra 35 cm donde la abundancia es muy baja (5x10⁶v/gss) y que coincide con valores muy altos de susceptibilidad magnética. Este horizonte divide a esta zona en dos subzonas:

Subzona 3a: 66-35 cm (4,500-2,000 cal AP), donde *Encyonema perpusillum* se encuentra acompañada por *Surirella linearis*, *Psammothidium helveticum* y *Pinnularia* aff. *viridis*, se nota un aumento en *Navicula* NTA a partir de los 50 cm. (3,400 cal AP).

Suzbonza 3b: 35-18 cm (2,000-500 cal AP; 50 a.C-1450 d.C), esta suzbona se caracteriza por presentar los valores más altos en la concentración total de diatomeas a lo largo del registro sedimentario y porque *Encyonema perpusillum* domina totalmente el registro, con abundancias muy bajas de las especies acompañantes entre las que destacan *Navicula* NTA, *Psammothidium helveticum* y hacia la cima *Stenopterobia delicatissima*. Hacia la cima de esta subzona se registra un aumento en los quistes de crisófitas.

Zona 4: 18-0 cm (1450-1950 d.C.), es la parte superior del registro sedimentario presenta valores bajo a intermedios en la concentración total de diatomeas y una oscilación importante en la abundancia de *Encyonema perpusillum* y en los valores de susceptibilidad magnética que definen dos subzonas:

Subzona 4a: 18-10 cm (1450-1860 d.C.), presenta valores un poco más altos de susceptibilidad magnética que la zona anterior, y un poco más bajos de concentración de diatomeas. Se tiene una disminución importante de *Encyonema perpusillum* que se asocia a un aumento en *Cavinula pseudocutiformis* y *Pinnularia microstauron* que sugieren ambientes someros, circumneutrales a levemente ácidos.

Subzona 4b: 10-0 cm (1860-1950), presenta un aumento marcado en la susceptibilidad magnética y un leve aumento en la concentración de diatomeas. Se presenta una recuperación de *Encyonema perpusillum* que nuevamente está asociada con *Navicula* NTA, *Psammothidium helveticum* y *Stenopterobia delicatissima*, lo que indica un retorno a las condiciones anteriores (zona 3).

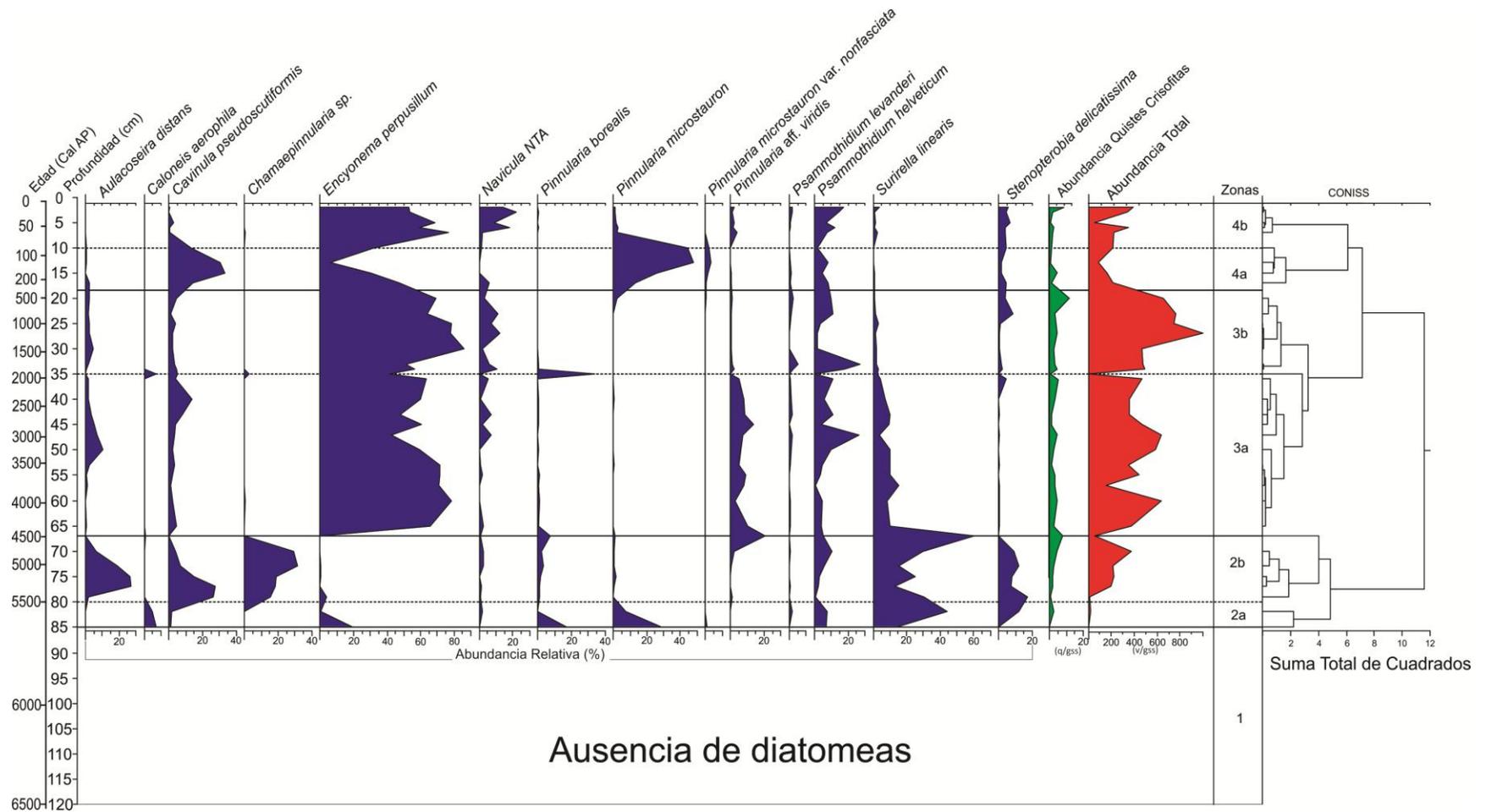


Figura 9. Abundancia relativa de especies de diatomeas mayores al >10% (azul), abundancia total de quistes de crisofíceas (verde) representado en q/gss, abundancia total de las especies de diatomeas (rojo) representado en v/gss, finalmente zonación y análisis de cúmulos (CONISS) en el registro sedimentario Luna-II-13, lago La Luna, Nevado de Toluca, México.

Índices de Biodiversidad

La riqueza de especies (S) así como los índices de diversidad de Shannon-Weiner (H' y 1D) y el índice Simpson (D) para cada una de las muestras analizadas se presentan en la Figura 10. En el registro sedimentario *Luna-II-13* el valor promedio de riqueza de especies (S) fue de 9.8, oscilando entre un mínimo de 6 (35 cm) y un máximo de 13 (73 cm), mientras que el valor promedio y los extremos de diversidad verdadera 1D fueron de 4 con un mínimo de 1.9 (30 cm) y un máximo de 6.7 (73 cm). El índice de Simpson (D) tuvo un promedio de 0.4 y osciló entre valores cercanos a 0.20 entre los 85 a 70 cm (zona 2) hasta valores de 0.75 a los 30 cm. En general los valores de diversidad (H' y 1D) mostraron sus valores más altos en esta parte de la secuencia (85 a 70 cm, zona 2) mientras que los valores del índice de Simpson (D) tuvieron sus valores más bajos (Figura. 10). Los valores más bajos de diversidad (H' y 1D) y los más altos del índice de Simpson (D) estuvieron presentes entre los 67 y 53 cm (base subzona 3a), nuevamente entre los 30 y 25 cm (cima subzona 3b) y en la muestra 7 cm (base subzona 4b).

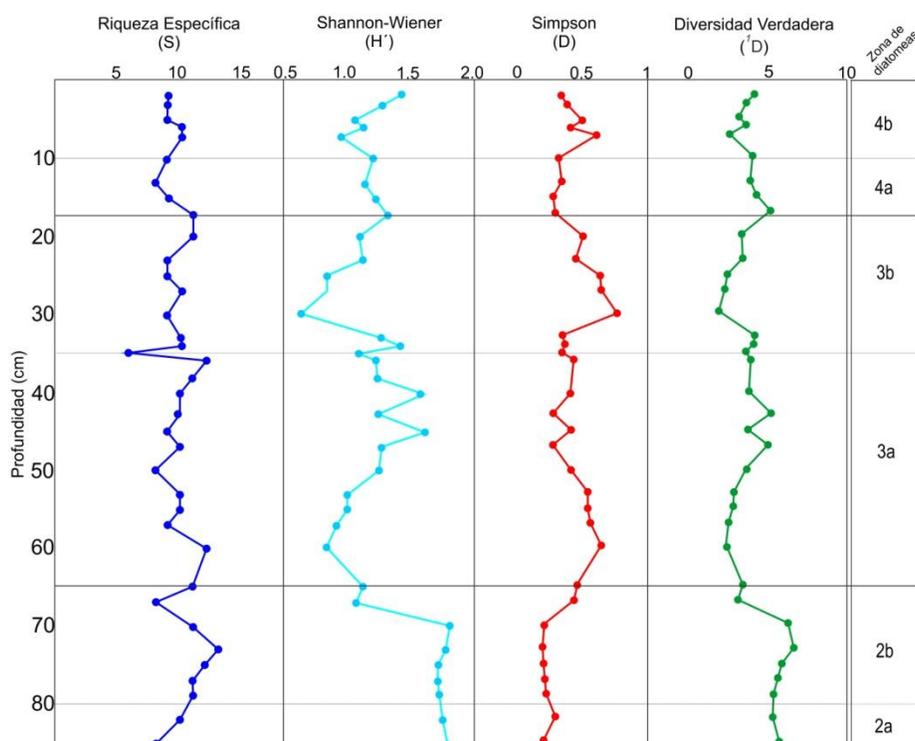


Figura 10. Riqueza Específica (S) Índice de diversidad de Shannon (H'), Simpson (D), Diversidad verdadera (1D) de especies a lo largo de las muestras analizadas para diatomeas del registro sedimentario *Luna-II-13*.

Discusión

Diversidad de los Conjuntos de Diatomeas

El registro sedimentario *Luna-II-13* mostró una riqueza de especies de diatomeas baja ($S_{\text{prom}} = 10$, $S_{\text{max}} = 13$) en comparación con el estudio realizado en una secuencia sedimentaria en la planicie lacustre de Chignahuapan, que se ubica en una zona próxima al volcán Nevado de Toluca, en donde la riqueza de especies promedio a lo largo de la secuencia fue el doble ($S_{\text{prom}} = 21.6$, $S_{\text{max}} = 39$) (Caballero, comunicación personal). En cuanto a los valores de diversidad (H' y 1D), éstos también fueron bajos, aun entre los 85 y 70 cm (zona 2), donde se presentan los valores más elevados, que sin embargo no exceden de 1.9 en el índice de Shannon-Weinner, considerando que para este índice, los valores por arriba de 3 son los que corresponden con comunidades diversas. Los valores de diversidad verdadera (1D) indican que en esta parte del registro (zona 2) la comunidad está formada por el equivalente a entre 5 y 7 especies equitativamente distribuidas, mientras que en el resto de la secuencia este valor es predominantemente menor a 5. Para el índice de Simpson (D), sus valores entre los 85 y 70 cm son los más bajos del registro (<0.3) lo que indica mayor equitatividad en la comunidad (Figura. 10). En el resto de la secuencia, cuando se establece la comunidad dominada por *Encyonema perpusillum* los valores del índice de Simpson son mayores. Este índice, que oscila entre 0 y 1, se interpreta como la probabilidad de que dos ejemplares extraídos al azar de una misma muestra correspondan a la misma especie, por lo que valores altos indican una menor equitatividad (mayor dominancia).

La probable limitante de la riqueza y diversidad de especies está relacionada con las características físicas y químicas de la Luna así como la localización única del lago, en comparación con el estudio paleolimnológico que se realizó en una zona de menor altitud, donde el cuerpo de agua presentaba aguas templadas, levemente alcalinas meso a eutrófico.

Ecología de los Conjuntos de Diatomeas

Las especies de diatomeas presentes en el registro sedimentario corresponden con las características de este lago de alta montaña, principalmente por ser especies de hábitat bentónico, comunes en lagos con una alta transparencia y bajo contenido de nutrientes de aguas ácidas y con baja conductividad eléctrica, en particular el conjunto dominado por *Encyonema perpusillum* y *Psammitodium helveticum*, que es muy similar al conjunto de diatomeas que actualmente habita en este lago. Sin embargo también se identifica un conjunto de diatomeas de hábitats aerófilos y de aguas circumneutrales, que es dominado por *Chamaepinnularia* sp. y *Surirella linearis*, acompañadas de especies como *Cavinula pseudoscutiformis* y *Aulacoseria distans* que caracteriza la zona 2b del registro. Finalmente se identifica una tercera comunidad de diatomeas dentro del registro sedimentario con un dominio de especies bentónicas y circumneutrales representados por *Cavinula pseudocutiformis*, *Pinnularia micrsotauron* así como su variedad *Pinnularia miscrotauron* var. *nonfasciata*, que está presente en la subzona 4a del registro, dichas especies indican condiciones circumneutrales a levemente ácidas, probablemente a condiciones similares a las que presenta el lago El Sol en la actualidad.

Reconstrucción Paleolimnológica y Paleoclimática

La base de la secuencia tiene una edad estimada de por lo menos 6,500 o posiblemente hasta 8,000 años cal AP, dependiendo de la tasa de sedimentación que se considere para la parte final de la secuencia. Tomando en cuenta que las fechas reportadas para el domo dacítico El Ombligo y la cronología glacial para el centro de México, que indican que el deshielo del cráter del Nevado de Toluca ocurrió entre 9,100-7,500 cal AP (Arce y Vázquez, 2003; Vázquez-Selem y Heine 2011), las edades extrapoladas son consistentes con la idea de que estos lagos se formaron al retirarse los hielos del cárter durante el Holoceno Temprano y que los sedimentos arenosos y desprovistos de diatomeas en la base de la secuencia correspondan con esta etapa. Los altos valores de susceptibilidad magnética en esta primera etapa nos brindan información de la cantidad de material que se movió dentro del cráter del volcán como probable consecuencia del arrastre de sedimentos a causa del deshielo y de la precipitación en un entorno muy posiblemente carente de vegetación.

Es posible que después de la erupción de los 12,500 años AP la altitud del piso del cráter fuera más elevada, lentamente hundiéndose con el transcurso del tiempo como consecuencia del colapso de la cámara magmática ubicada debajo del volcán, este hundimiento ha hecho que el domo dacítico “El Ombligo” se encuentre por arriba del piso del cráter, y posiblemente dio lugar a la formación de la depresión en la que se desarrolló el lago La Luna hace alrededor de 6,500 años.

La presencia del hielo dentro del cráter del Nevado durante el Holoceno (9,100 cal AP) se ha asociado con temperaturas $\sim 3.3^{\circ}\text{C}$ menores a las actuales (Lozano-Gracia y Vázquez-Selem, 2005; Vázquez-Selem, 2003; Vázquez-Selem, 2004; Vázquez-Selem y Heine 2011). Sin embargo durante el Óptimo Climático del Holoceno se presentaron veranos ligeramente más cálidos en el Hemisferio Norte que tuvieron diferentes consecuencias alrededor del mundo (Kalis *et al.*, 2003), una de estas consecuencias fue la retracción de los hielos glaciares establecidos en las principales montañas de la zona central de México marcando el final del avance glacial denominado Milpulco-2, el cual registra una retracción a final de los $\sim 7,500$ años cal AP. Este último avance glacial durante el Holoceno correlaciona con un descenso generalizado en la temperatura del Hemisferio Norte, hace $\sim 8,200$ años AP (Mayewski *et al.*, 2004).

El registro indica condiciones lacustres incipientes a partir de los 6,000 años cal AP cuando están presentes en baja abundancia variedades típicas de aguas muy someras, asociadas a suelos húmedos, rocas y musgos y que inclusive pudieran tolerar desecación ocasionalmente como *Pinnularia borealis* y *Caloneis aerophila*, posteriormente acompañadas por especies bentónicas como *Surirella linearis*. La disminución en la susceptibilidad magnética sugiere un menor aporte de terrígenos que puede estar asociado por un lado a una mayor estabilidad de la cuenca al haber sido ya movilizado el material más inestables y posiblemente por haber desarrollado ya algún tipo de vegetación alpina, y por otro lado también una baja precipitación y escorrentía, que correlaciona con bajos niveles lacustres. La especie posiblemente endémica de La Luna *Navicula* NTA está presente en el registro sedimentario desde este momento.

Alrededor de los $\sim 5,600$ años cal AP el lago es impactado por la caída de una tefra, que correlaciona con edad con la Pómez Ocre producto de una erupción Pliniana del

Popocatepetl (Siebe *et al.*, 2005; Arana-Salinas *et al.*, 2010). Esta misma tefra fue fechada e identificada en una localidad cercana al Iztaccihuatl (Lozano-Gracia y Vázquez-Selem, 2005) donde se realizó un estudio paleoambiental basado en polen. Es a partir de la caída de esta tefra que se da una mayor concentración de diatomeas y un cambio en las asociaciones presentes en el lago La Luna, aparecen *Chamaepinnularia* sp. *Surirella linearis*, *Cavinula pseudocutiformis* y *Aulacoseira distans* que indican un ambiente lacustre mejor establecido con un pH del agua menos ácido que el presente, si bien tirantes de agua muy someros. En el registro de Santa Cruz Atizapán se tienen evidencias de climas relativamente secos alrededor de los 5,500 a 5,000 años cal AP (Caballero *et al.*, 2002), lo que es consistente con la idea de ambientes lacustres muy someros.

Al terminar esta etapa de sequía a partir de los ~4,500 años cal AP se establecen condiciones más estables en el lago como lo demuestra la mayor abundancia de diatomeas y el cambio de un conjunto de especies aerófilos hacia especies bentónicas, y se establece como especie dominante *Encyonema perpusillum* la cual continua siendo dominante en este lago hasta la actualidad (Caballero 1996; Cuna *et al.*, 2013), por lo que se sugiere el establecimiento de condiciones similares a las modernas a partir de los 4,500 años AP. La historia del lago, sin embargo, estuvo marcado por dos eventos importantes: el pico de susceptibilidad magnética asociado con la aparición nuevamente de *Caloneis aerophila* y *Pinnularia borealis* alrededor de los 2,000 años cal AP (ca. 50 a.C.) y el máximo en *Cavinula pseudocutiformis* y *Pinnularia microstauron* entre los 500-50 años AP.

El primer evento hace 2,000 años AP (50 a.C.) parece corresponder con un momento de un aporte rápido de sedimento al lago, posiblemente asociado con un derrumbe que brevemente altero el lago, favoreciendo a especies aerófilos (*Caloneis aerophila* y *Pinnularia borealis*). El segundo evento se centra cerca de los 200 años AP (1750 d.C.) que corresponde con el final de la Pequeña Edad de Hielo (PEH), esta etapa se registra con periodos secos y en respuesta una disminución en el nivel del lago, así como un aumento en el pH denotado por la abundancia de *Cavinula pseudocutiformis* y *Pinnularia microstauron*, además de una disminución en la abundancia de *Navicula* NTA y la presencia de algunos frústulos de *Navicula* NTB responden a estas condiciones de aumento en el pH. Estas especies presentan un desarrollo óptimo por arriba de un pH ~6,

actualmente dichas especies no se encuentran presente en el lago La Luna, pero son predominantes en el lago El Sol.

Cerca de los 50 años AP (900 d.C.) se muestra una recuperación del conjunto dominado por *Encyonema perpusillum*, *Navicula* NTA y *Psammothidium helveticum* así como un aumento en los niveles de susceptibilidad magnética lo que se podría traducir como condiciones de precipitación mayor similar a lo que presenta hoy en día.

Conclusiones

- La secuencia sedimentaria *Luna-II-13* mostró un alcance cronológico de ~7,500 AP, relacionado con periodos de retracción de glaciares en las montañas del centro de México, asociados a los altos valores de susceptibilidad magnética por arrastre de terrígenos y el nulo registro de diatomeas en la parte basal.
- Se presenta un cambio marcado en las asociaciones de diatomeas a lo largo de la secundaria sedimentaria. En un primer momento de la historia del lago, hace unos 6,000 años AP existe el predominio de especies aerofilas, circumneutrales (*Caloneis aerophila*, *Pinularia borealis*, *Chamaepinnularia* sp.), posteriormente alrededor de los 4,600 años AP el ecosistema cambia y las especies de diatomeas dominantes son ahora bentónicas acidófilas (*Encyonema perpusillum*), lo que se traduce como un cambio en las condiciones químicas y físicas del lago La Luna, estableciendo desde este momento un lago con características limnológicas similares a las del lago actual.
- La Pequeña Edad de Hielo reportado por Cuna *et al.*, (2013) se vuelve a registrar con la misma señal, como un aumento de *Cavinula pseudocutiformis* y *Pinnularia microstauron* entre ~1600 a ~1900 d.C.
- El registró *Luna-II-13*, presento una baja riqueza y diversidad de especies a lo largo de la secuencia sedimentaria.
- La especie posiblemente endémica de La Luna (*Navicula* NTA) está presente desde las etapas tempranas del registro de diatomeas de este lago.

Referencias Bibliográficas.

- Aguilar, V. (2003). Aguas continentales y diversidad biológica de México: un recuento actual. *Biodiversitas: Boletín bimestral de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad*, 8(48), 1-15.
- Albay, M., y Akçaalan, R. (2008). Effects of water quality and hydrologic drivers on periphyton colonization on *Sparganium erectum* in two Turkish lakes with different mixing regimes. *Environ Monit Assess*, 146(1-3), 171-81.
- Alcocer, J., Osegura, L., Escobar, E., Peralta L. y Lugo, A. (2004). Phytoplankton Biomass and Water Chemistry in Two High Mountain Tropical Lakes in Central Mexico. *Artic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(3), 342-346.
- Alley, R. (2000). The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quaternary Science Review*, 19(1), 213-226.
- Almeida-Leñero, L., Cleef, J., y Gonzales-Trápaga, A. (2004). Plant communities of the zacatonal alpino area of the Popocatepetl and Nevado de Toluca volcanoes in Central Mexico. *Phytocoenologia*, 34(1), 91- 134.
- Arana-Salinas, L., Siebe, C. y Macías J. (2010). Dynamics of the ca. 4965 yr 14C BP “Ochre Pumice” Plinian eruption of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 192(3), 212-231.
- Andren, C. y Jarlman, A. (2008). Benthic diatoms as indicators of acidity in streams. *Hydrobiologie*, 173(3), 237-253.
- Antoniadou, D., Hamilton, P., Hinz, F., Douglas, M. y Smol, P. (2009). Seven new species of freshwater diatoms (Bacillariophyceae) from the Canadian Arctic Archipelago. *Nova Hedwigia*, 88(1-2), 57-80.
- Arce, J., y Vázquez, S. (2003). The 10.5 KA Plinian eruption of Nevado de Toluca, México: Stratigraphy and hazard implications. *Geological Society of America Bulletin*, 115(2), 230-248.
- Arce, J., Macias, J., Gardner, J. y Layer, P. (2006). A 2.5 ka history of dacitic magmatism at Nevado de Toluca, Mexico: petrological, 40Ar-39Ar dating, and experimental constraints on petrogenesis. *Journal of Petrology*, 47(1): 457-479.
- Armienta, M., De la Cruz-Reyna, S., y Macías, J. (2000). Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichón and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 97(14), 105-125.
- Bahls, L. (2014a). *Pinnularia borealis*. En: Diatoms of the United States. Recuperado de http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/species/pinnularia_borealis
- Bahls, L. (2014b). *Pinnularia microstauron*. En: Diatoms of the United States. Recuperado de http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/species/pinnularia_microstauron
- Bak, M., Witkowski, A., Zelazna-Wieczorek, J., Wojtal, A., Szczepocka, E., Szulc, A., y Szulc, B. (2012). *Klucz do oznaczania okrzemek w fitobentosie na potrzeby oceny stanu ekologicznego wód powierzchniowych w Polsce*. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa Główny Inspektorat Ochrony Środowiska.
- Battarbee, R., Thompson, R., Catalan, J., Grytnes, J., y Birks, H. (2002). Climate variability and ecosystem dynamics of remote alpine and arctic lakes: The MOLAR project. *Journal of Paleolimnology*, 28(1), 1-6.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., Demenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I. y Bonani, G. (1997). A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278(5341), 1257-1266.

- Bond, G., Kromer, J., Beer, R., Muscheler, M., Evans, W., Showers, S., Hoffman, R., Lotti-Bond, I., y Hadjas, G. (2001). Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate during the Holocene. *Science*, 5549(294), 2130-2136.
- Bowler, C., Vardi, A., y Allen, A. (2010). Oceanographic and Biogeochemical Insights from Diatom Genomes. *Annual Review of Marine Science*, 2, 333-65.
- Bramburger, A., Douglas, G., Hamilton, P., Hinz, F., y Hehanussa, P. (2006). An examination of species within the genus *Surirella* from the Malili lakes, Sulawesi Island, Indonesia, with descriptions of 11 new taxa. *Diatom Research*, 21(1), 1-56.
- Bradley, R., Hughes, M., y Diaz, H. (2003). Climate in Medieval time. *Science*, 302(5644), 404-405.
- Briner, J., Michelutti, N., Francis, D., Miller, G., Axford, Y., Wooller, M., y Wolfe, A. (2006). A multi-proxy lacustrine record of Holocene climate change on northeastern Baffin Island, Arctic Canada. *Quaternary Research*, 65(3), 431-442.
- Bukhtiyarova, I. Y Stanislavskaya, e. (2013). *Psammothidium vernadskyi* sp. Nov. (bacillariophyta) from the blue lake, east Siberia, Russia. *Algologia*, 23(1), 96-107.
- Burgis, M. y Morris, P. (1987). *The Natural History of Lakes*, Cambridge University Press.
- Burns, N., Deely, J., Hall, J., y Safi, K. (1997). Comparing past and present trophic states of seven Central Volcanic Plateau lakes, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 31(1), 71-87.
- Cabala, J., y Rahmonov, O. (2004). Cyanophyta and algae as an important component of biological crust from the Pustynia Błędowska desert (Poland). *Polish Botanical Journal*, 49(1), 93-100.
- Caballero, M. (1996). The diatom flora of two acid lakes in central México, *Diatom Reserch*. 11(2), 224-240.
- Caballero, M., Ortega, B., Valadez, F., Metcalfe, S., Macias, J. y 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(1), 217-235.
- Caballero, M., Valadez, F., y Rodríguez, A. (2013). Paleolimnología: Como descifrar la historia de los lagos y su entorno a partir del estudio de sus sedimentos. *Paleontología Mexicana*, 3(1), 22-28.
- Caljon, A. y Cocquyt, C. (1992). Diatoms from surface sediments of the Northern part of Lake Tanganyika. *Hydrobiologia*, 230(2), 135-156.
- Catalan, J., Camarero, L., Felip, M., y Pla, S. (2006). High mountain lakes: extreme habitats and witnesses of environmental changes. *Limnetica*, 1-2(25), 551-584.
- Camburn, K. y Charles, J. (2000). Diatoms of low-alkalinity lakes in the northeastern United States. *Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Special Publication* 18(1): 1-152.
- Cantonati, M. y Lange-Bertalot, H. (2009). On the ultrastructure of *Chamaepinnularia schaupiana* Lange-Bertalot & Metzeltin (Naviculaceae, L.). *Diatom Research*, 24(1), 225-231.
- Capra, L., Arce, L. y Macías, J. (2006). The lower Toluca Pumice: A ca. 21,700 yr B.P Plinian eruption of Nevado de Toluca Volcano, México. *Geological Society of America*, 402(1), 155-173.
- Chacón-Baca, E., Beraldi-Campesi, H., Cevallos-Ferriz, S., Knoll, A. y Golubic, S. (2002). 70 Ma nonmarine diatoms from northern México. *Geology*, 30(3), 279-281.

- Chen G., Dalton, C., Leira, M. y Taylor, D. (2008). Diatom-based total phosphorus (TP) and pH transfer functions for the Irish Ecoregion. *Journal of Paleolimnology*, 40(1),143-163.
- Chen, X., Qin, Y., Stevenson, M. y McGowan, S. (2014). Diatom communities along pH and hydrological gradients in three montane mires, central China. *Ecological Indicators*, 45(1), 123–129.
- Ciniglia, C., Cennamo, P., De Stefano, M., Pinto, G., Caputo, P. y Polio, A. (2007). *Pinnularia obscura* Krasske (Bacillariophyceae, Bacillariophyta) from acidic environments: characterization and comparison with other acid-tolerant *Pinnularia* species. *Fundamental and Applied Limnology*, 170(1), 29-47.
- Cocquyt, C. y Jahn, R. (2007). *Surirella engleri* o Müller-A study of its original infraspecific types, variability and distribution. *Diatom Research*, 22(1), 1-16.
- Cocquyt, C., Jüttner, J., y Wolf-Henning, K. (2013a). Reinvestigation of West African *Surirellaceae* (Bacillariophyta) described by Woodhead and Tweed from Sierra Leone. *Diatom Research*, 28(2), 121-129.
- Cocquyt, C., De Haan, M. y Taylor, J. (2013b). *Cavinula lilandae* (Bacillariophyta), A new diatom species from the Congo Basin, Central Africa. *Diatom Research*, 28(2), 157-163.
- Correa-Metrio, A., Dechnik, Y., Lozano-Garcia, S. y Caballero, 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.
- Cremer, H. y Wagner, B. (2003). The diatom flora in the ultra-oligotrophic Lake El'gygytgyn, Chukotka. *Polar Biology*, 26(2), 105-114.
- Cronin, M. (2010). *Paleoclimates: understanding climate change past and present*, Columba University Press.
- Cuna, E., Zawisza, E., Caballero, M., Ruiz-Fernández, A., Lozano-García, S. y Alcocer, J. (2013). Environmental impacts of Little Ice Age cooling in central Mexico recorded in the sediments of a tropical alpine lake. *Journal of Paleolimnology*, 51(1), 1-14.
- Cuna, E. (2015). *Registros de cambios ambientales en dos lagos de alta montaña en México con base en sus algas modernas y fósiles*. Tesis de doctorado. Posgrado en ciencias biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México. 158 pp.
- Cvetkoska, A., Levkov, Z., Hamilton, P. y Potapova, M. (2014). The biogeographic distribution of *Cavinula* (Bacillariophyceae) in North America with the descriptions of two new species. *Phytotaxa*, 184(4), 181-207.
- Daubenmire, R. (1979). *Ecología Vegetal*. Limusa, México.
- De la Lanza-Espino, G. y García, C. (1995). *Lagos y Presas de México*, Centro de Ecología y Desarrollo, México.
- Denys, L., Muylaert, k., Krammer, K., Joosten, M. y Rioual P. (2003), *Aulacoseira subborealis* stat. nov. (Bacillariophyceae): a common but neglected plankton diatom. *Nova Hedwigia*, 77(3-4), 407-427.
- Dunck, B. Souza, I. y Machado-Souza, M. (2012). *Stenopterobia* and *Surirella* (Bacillariophyceae, Surirellaceae) of Lago dos Tigres System, Britania, Goiás. *Rodriguésia*, 63(3), 525-539.
- Enache, M., Potapova, M. Sheibley, R. y Moran, P. (2013). Three new Psammothidium species from lakes of Olympic and Cascade Mountains in Washington State, USA. *Phytotaxa*, 127(1), 49-57.
- Escobar, J., Restrepo, J. y Martínez, J. (2005). La paleolimnología como herramienta para el estudio y manejo de embalses. *Gestión y Ambiente*, 8(2), 51-59.

- Falasco, E. y Bona, F. (2011). Diatom community biodiversity in an Alpine protected area: a study in the Maritime Alps Natural Park. *Journal of Limnology*, 70(2), 157-167.
- Falkowski, P., Katz, M., Knoll, A., Quigg, A., Raven, J., Schofield, O. y Taylor, F. (2004). The Evolution of Modern Eukaryotic Phytoplankton. *Science*, 305(5682), 305-354.
- Flower R. (2005). A taxonomic and ecological study of diatoms from freshwater habitats in the Falkland islands, South Atlantic. *Diatom Research*, 20(1), 23-96.
- Flower, R., Kernan, M., Noon, P. y Jones V. (2012). On the factors affecting distributions of freshwater diatom species in a remote South Atlantic archipelago. *European Journal of Phycology*, 47(3), 291-309.
- Frey, D. (1988). What is paleolimnology?. *Journal of Paleolimnology*, 1(1), 5-8.
- Fulford-Smith, S. y Sikes, E. (1996). The evolution of Ace Lake, Antarctica, determined from sedimentary diatom assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 124(1-2), 73-86.
- Foged N. (1964). *Freshwater diatoms from Spitsbergen*. Tromsø Museums Skrifter, 205 pp.
- Gaiser, E. y Johansen, J. (2000). Freshwater diatoms from Carolina bays and other isolated wetlands on the Atlantic coastal plain of South Carolina, U.S.A., with descriptions of seven taxa new to science. *Diatom Research*, 15(1), 75-130.
- García-Calderón N. (2011). *Los ecosistemas como factor geográfico de distribución de los suelos*. En: Krasilnikov, P., Jiménez-Nava, F., Reyna-Trujillo, T. & García-Calderón, N., *Geografía de suelos de México*. Prensa de ciencias-Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- García-Palomo, A., Macías, J., Garduño, V. y Espíndola, J. (2002). Geology of Nevado de Toluca volcano region and surrounding areas, central Mexico. *Geological Society of America Map and Chart Series*, 89(1), 1-26.
- García, E. (1988). *Modificación del sistema de clasificación de Köppen*. E García, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García-Martínez, B. (2000). Los nombres del Nevado de Toluca. *Arqueología Mexicana*, 7(43), 24-26.
- Gesierich, D. y Rott, E. (2004). Benthic Algae and Mosses from Aquatic Habitats in the Catchment of a Glacial Stream (Rotmoos, Ötztal, Austria). *Berichte des naturwissenschaftlich-medizinischen Vereins in Innsbruck*, 91(1), 7-42.
- Ginn, B., Rajaratnam, T., Cumming, B. y Smol, J. (2015). Establishing realistic management objectives for urban lakes using paleolimnological techniques: an example from Halifax Region (Nova Scotia, Canada). *Lake and Reservoir Management*, 31(2), 92-108.
- Grimm, E. (2004). *Tilia and TGView 2.0.2 Illinois State Museum*. Research and Collection Center, Springfield, Illinois.
- Gold, C., Feurtet-Mazel, A., Coste, M. y Boudou, A. (2002). Field transfer of periphytic diatom communities to assess short-term structural effects of metals (Cd, Zn) in rivers. *Water Research*, 36(14), 3654-3664.
- Guilizzoni, P., Marchetto, A., Lami, A., Cameron, N., Appleby, P., Rose, N., Schnell, A., Belis, A., Giorgis, A. y Guzzi, L. (1996). The environmental history of a mountain lake (Lago Paione Superiore, Central Alps, Italy) for the last c. 100 years: a multidisciplinary, palaeolimnological study. *Journal of Paleolimnology*, 15(1), 245-264.

- Hasle, G. y Syverste, E. (1997). *Marine Diatoms*. En: Thomas, C., Hasle, G., Syvertsen, E., Steidinger, K. & Tangen, K., Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates, Elsevier Inc.
- Harwood, D. y Gersonde, R. (1990). Lower Cretaceous diatoms from ODP leg 113 site 693 (Weddell Sea). Part 2: resting spores, chrysophycean cysts, and endoskeletal dinoflagellate, and notes on the origin of diatoms. En: Barker, P., Kennett J., et al., (eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 113*: College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Hirst, H., Juttner, I. y Ornerod, S. (2002). Comparing the responses of diatoms and macroinvertebrates to metals in upland streams of Wales and Cornwall. *Freshwater Biology*, 47(1) 1752-1765.
- Horrocks, M., Jones, M., Nichol, S. y Sutton, D. (2002). Wetland Microfossils in Soil: Implications for the Study of Land Use on Archaeological Landscapes, *Environmental Archaeology: The journal of human palaeology*, 7(1), 101-106.
- Ibarra D., Alcocer, J., Oseguera, L. y Merino-Ibarra, M. (2007), Dinámica estacional e interanual de dos lagos tropicales de alta montaña en el centro de México en: *Tendencia de Investigación. En: limnología tropical: respectivas universitarias en Latinoamérica*. Asociación Mexicana de Limnología A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM y Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología, México.
- Jeffrey, S. y Vesik M. (1997). Introduction to marine phytoplankton and their pigments signatures. En: Jeffrey, S. & Mantoura, S., *Phytoplankton pigments in Oceanography. SCOR-UNESCO*, Francia.
- Kalis, A., Merkt, J. y Wunderlich, J. (2003), Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe-human impact and natural causes. *Quaternary Science Reviews*, 22(1), 33-79.
- Keatly, B., Douglas, M. y Smol, J. (2008). Prolonged ice cover dampens diatom community responses to recent climatic change in high arctic lakes. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 40(2), 364-372.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1986). *Bacillariophyceae. Teil 1: Naviculaceae. Die Süßwasserflora von Mitteleuropa Band 2/1*. Ettl, H., Gerloff, J., Heyning, H. & Mollenhauer, D. (eds.). Gustav Fischer Verlag. Germany, Stuttgart.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1988). *Bacillariophyceae. Teil 2: Bacillariaceae, Ephitemiaceae, Surirellaceae. Die Süßwasserflora von Mitteleuropa Band 2/2*. Ettl, H., Gerloff, J., Heyning, H. & Mollenhauer, D. (eds.). Gustav Fischer Verlag. Germany, Stuttgart.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1991). *Bacillariophyceae. Teil 4: Achnantheaceae. Die Süßwasserflora von Mitteleuropa Band 2/4*. Ettl, H., Gerloff, J., Heyning, H. & Mollenhauer, D. (eds.). Gustav Fischer Verlag. Germany, Stuttgart.
- Krammer, K. (1997). *Die cymbelloiden Diatomeen. Eine Monographie der weltweit bekannten Taxa. Teil 2. Encyonema part., Encyonopsis und Cymbellopsis. Bibliotheca Diatomologica*. Cramer. Stuttgart.
- Krammer, K. (2000). *The Genus Pinnularia*. Vol 1, ARG Gantner Verlag, Fankfurt, Germany,
- Kroger, N. y Poulsen, N. (2008). Diatoms-From cell wall biogenesis to nanotechnology. *The Annual Review of Genetics*, 42(1), 83-107.
- Kurek, J., Cwynar, L., Spear, R. y Schulz, M. (2002). A high resolution Holocene climate record from the white mountains of eastern North America. *Geological Society of America Abstracts With programs* 34: 49.
- Lavoie, C., Pienitz, R. y Allard, M. (2006). Diatom flora of the Nastapoka River delta: an emerging coastal system on the eastern shore of Hudson Bay, subarctic Québec. *Nova Hedwigia*, 83(1-2), 31-51.

- Law, A., Anderson, N. y McGowan. (2015). Spatial and temporal variability of lake ontogeny in South-Western Greenland. *Quaternary Science Reviews*, 126(1) 1-16.
- Linares, C. y Sánchez, C. (2007). Comunidades de diatomeas epipelicas en las lagunas de alta montaña de Sierra Nevada (Granada, España). *Limnetica*, 26(1), 99-113.
- Long, A., Woodroffe, S., Milne, G., Bryant, C. y Wake, L. (2010). Relative sea level change in west Greenland during the last millennium. *Quaternary Science Reviews*, 29(3-4), 367-383.
- Lozano-García, S. y Vázquez-Selem, L. (2005). A high-elevation Holocene pollen record from Iztaccihuatl volcano, central Mexico. *The Holocene*, 15(3), 329-338.
- Lowe, R. (1974). *Environmental requirements and pollution tolerance of freshwater diatoms*. Ohio.
- Lukesova, A. y Hoffmann, L. (1996). Soil algae from acid rain impacted forest areas of the Krusne hory Mts. 1. Algal communities. *Vegetatio*, 125(2), 123-136.
- Lynn, A. (2003). A new species of *Meridion* (bacillariophyceae) from Western North Carolina. *Southeastern naturalist*, 2(3), 409-418.
- Machuca, N., Carvalho, L. y Veiga, L. (2003). Transfer of *Surirella schweickerdii* to the genus *Stenopterobia*. *Diatom Research*, 18(1), 185-190.
- Macias, J., Garcia, P., Arce, J., Siebe, C., Espíndola, J., Komorowski, J. y Scott, K. (1997). Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan Volcanoes, Central Mexico. En: Kowallis P. Proterozoic to recent stratigraphy, tectonics, and volcanology: Utah, Nevada, southern Idaho, and central Mexico. Brigham Young University, *Geology Studies*, 42(1), 493-528.
- Maidana, N., Seeligmann, C. y Morales, M. (2009). *Bacillariophyceae* del complejo lagunar Vilama (Jujuy, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 44(3-4), 257-271.
- Mann, M. (2002). Medieval Climatic Optimum. En MacCracken, M. y Perry S. (2002). The earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change. *Encyclopedia of Global Environmental change*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Mann, M., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R., Hughes, M., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G. y Ni, F. (2009). Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 326(5957), 1256-1260.
- Marcos, A., Espinosa, A., Mancini, V. y Favier M. (2014). Múltiples Indicadores de los Cambios Ambientales Desde el Holoceno Medio en el Noreste de Patagonia (Bajo de la Quinta), Argentina. *Asociación Paleontológica Argentina*, 51(4), 344-360.
- Margalef, R. (1983). *Limnología*, Edición Omega, Barcelona.
- Marx, F. y Uhen, M. (2010). Climate, Critters, and Cetaceans: Cenozoic Drivers of the Evolution of Modern Whales. *Science*, (327)5968, 993-996.
- Massaferró, J., Recasens, C., Larocque-Tobler, I., Maidana, N. y Zolitschka, B. (2013). Major lake level fluctuations and climate changes for the past 16 000 years as reflected by diatoms and chironomids preserved in the sediment of Laguna Potrok Aike, Southern Patagonia. *Quaternary Science Review*, 71(1), 167-174.

- Mayewski, P., Rohling, E., Stager, J., Karlén, W., Maasch, K., Meeker, L., Meyerson, E., Gasse, F., Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R. y Steig, E. (2004). Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62(1), 246-255.
- Manoylov, K. (2007). On some *Psammothidium* species from rivers in the United States. *Diatom Research*, 22(2), 317-327.
- McLaughlin, Anne-Marie. (2014). *Reconstructing Late Holocene Sea- Level Changes in the Forth Valley, Scotland (UK)*. Unpublished Thesis. Coventry: Coventry University.
- Medlin, L., Kooistra, W., Gersonde, R., Sims, P. y Wellbrock, U. (1997) Is the origin of diatoms related to the end-Permian mass extinction?. *Nova Hedwigia*, 65(1), 1-11.
- Michelutti, N., Smol, J. y Douglas M. (2006). Ecological characteristics of modern assemblage from Axel Heiberg Island (High Arctic Canada) and their application to paleolimnological inference models. *Canadian Journal of Botany*, (81)1, 695-713
- Mogna, M., Cantonati, M., Andreucci, F., Angeli, N., Berta, G. y Miserere, I. (2015), Diatom communities and vegetation of springs in the South-Western Alps. *Acta Botanica Croatica*. 74(2), 265-285.
- Muscheler, R.; Beer, J. y Vonmoos, M. (2004). Causes and timing of the 8200 yr BP event inferred from the comparison of the GRIP ¹⁰Be and the tree ring D ¹⁴C record. *Quaternary Science Reviews*, 23(20), 2101-2111.
- Norini, G., Capra, L., Gropelli, G. y Lagmay, A.M.F. (2008). Quaternary sector collapses of Nevado de Toluca volcano (Mexico) governed by regional tectonics and volcanic evolution, *Geosphere*, 4(5), 854-871.
- Novelo, E. (2012). *Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Bacillariophyta*, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Öberg, H., Risberg, J. y Stabell, B. (2009). Morphology, valve ultrastructure and stratigraphical variability of *discostella* taxa in a tropical crater lake, Northern Tanzania. *Diatom Research*, 24(2), 341-356.
- Oliveira, M., Torgan, L. y Silvana, C. (2002). Diatomáceas perifíticas dos arroios sampaio e sampainho, rio grande do sul, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 16(2), 151-160.
- Oliva-Martínez, G., Ramirez, J., Garduño-Solórzano, G., Cañetas-Ortega, J. y Ortega, M. (2005). Caracterización diatomológica en tres cuerpos de agua de los humedales de Jilotepec-Ixtlahuaca, Estado de México, *Hidrobiológica*, 15(1), 1-26.
- Oseguera, P. (2004). *Ecología de las comunidades bentónicas de dos lagos de alta montaña*. Tesis de Maestría. Posgrado de ciencias del mar y limnología. Universidad Nacional Autónoma de México, 105 pp.
- Otu, M., y Spaulding, S. (2011). *Cavinula pseudoscutiformis*. En: Diatoms of the United States. Recuperado de http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/species/cavinula_pseudoscutiformis
- Pérez y Boscolo. (2010). Clima en España: Pasado, Presente y Futuro. *Informe de evaluación del cambio climático regional*, Clivar, España.
- Potapova, M. (2009). *Aulacoseira alpigena*. En: Diatoms of the United States. Recuperado de http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/species/Aulacoseira_alpigena
- Potapova, M. (2010). *Psammothidium helveticum*. En: Diatoms of the United States. Recuperado de http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/species/psammothidium_helveticum

- Puertas, M., Valero-Garcés, B., Mata, M., Gonzales-Barrios, A., Delgado-Huertas, A., Gonzales-Samperiz, P., Moreno, A. y Bao, R. (2009). La paleolimnología en la gestión de los humedales: la laguna de Zoñar. En: *La geología e hidrología en la investigación de humedales*, Instituto geológico y minero de España.
- Quintela, A., Almeida, S., Terroso, D., Ferreira da Silva, E., Forjaz, V. y Rocha, F. (2013), Diatom assemblages of thermal and mineral waters from volcanic environments in São Miguel Island, Azores, *Diatom Research*, 28(4), 407-417.
- Ramírez, A. (2008). Diatomeas perifíticas en diferentes tramos de dos sistemas lóticos de alta montaña (páramo de Santurbán, Norte de Santander, Colombia) y su relación con las variables ambientales, *Acta biológica Colombiana*, 13(1), 199-216.
- Rühland, K. y Smol, J. (2005). Diatom shifts as evidence for recent Subarctic warming in a remote tundra lake, NWT, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 226(1-3), 1-16.
- Roberts, D. y McMinn, A. (1999). A diatom-based palaeosalinity history of Ace Lake, Vestfold Hills, Antarctica. *The Holocene*, 9(4), 401-408.
- Robinson, M. (2004), A Late glacial and Holocene diatom record from Clettndal, Shetland Islands, northern Scotland. *Journal of Paleolimnology*, 31(3), 295-319.
- Rzedowski, J. (1981). *Vegetación de México*, Editorial Limusa, México.
- Sabater, S. y Ramon-Roca J. (1992). Ecological and biogeographical aspects of diatom distribution in Pyrenean spring. *British Phycological Journal*, 27(2), 203-213.
- Salomoni, S. y Torgan, L. (2008). Epilithic diatoms as organic contamination degree indicators in Guaíba Lake, Southern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 20(4), 313-324.
- Sánchez, M., Reyes, N., Lugo, A., Alcocer, J., Oseguera, L. y Peralta, L. (2004). Variación del bacterioplancton en dos lagos mexicanos de alta montaña. *Scientiae Naturae*, 7(1), 69-83.
- Sarma, J., Interlandi, S., Doyle, S., Michel, T. y Williamson C. (1996). Rotifers from high altitude crater-lakes at Nevado de Toluca Volcano, Mexico. *Hidrobiologica*, 6(1-2), 33-38.
- Saros, J., Fritz, S., y Smith, A. (2000). Shifts in mid- to late-Holocene anion composition in Elk Lake (Grant County, Minnesota): comparison of diatom and ostracode inferences. *Quaternary International*, 67(1), 37-46.
- Saulnier-Talbot, E., Larocque-Tobler, I., Gregory-Eaves, I. y Reinhard Pienitz. (2015). Response of Lacustrine Biota to Late Holocene Climate and Environmental Conditions in Northernmost Ungava (Canada). *Arctic*, 68(2), 153-168.
- Schmid, Anna-Maria. (2003). Endobacteria in the diatom *pinnularia* (bacillariophyceae). I. “scattered ct-nucleoids” explained: DAPI-DNA complexes stem from exoplastidial bacteria boring into the chloroplasts. *Journal of psychology*, 39(1), 122-138.
- Self, S., Zhao, J., Holasek, R., Torres, R. y King A. (1999). The atmospheric Impact of the Pinatubo Eruption, Fire and Mud: Eruption and lahars of Mount Pinatubo, Philippines, disponible en: <http://pubs.usgs.gov/pinatubo/self/>
- Servicio Meteorológico Nacional SMN. (2015), <http://smn.cna.gob.mx>
- Seckbach, J. y Kociolek, P. (2011). *The diatom world*, Springer, Science Business Media B.V.
- Sherwood, A. y Sheath, R. (1999). Seasonality of macroalgae and epilithic diatoms in spring-fed streams in Texas, USA. *Hydrobiologia*, 390(1), 73-82.

- Sickman, J., Bennett, D., Lucero, D., Whitmore, J. y Kenney, W. (2013). Diatom-inference models for acid neutralizing capacity and nitrate based on 41 calibration lakes in the Sierra Nevada, California, USA. *Journal of Paleolimnology*, 50(1), 159–174.
- Siebe, C., Arana-Salinas, L. y Abrams, M. (2005). Geology and radiocarbon ages of Tlaloc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Hijo del Cuauhtzin, Teuhtli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141(1), 225-243.
- Sigala, I., Lozano-García, S., Escobar, J., Pérez, L. y Gallegos-Neyra, E. (2015) Testate Amoebae (Amebozoa: Arcellinida) in Tropical Lakes of Central Mexico. *Revista de Biología Tropical*. 64(1), 377-397.
- Siver, P. y Hamilton, P. (2005). Observations on new and rare species of freshwater diatoms from Cape Cod, Massachusetts, USA. *Canadian Journal of Botany*, 83(1), 362-378.
- Siver, P. y Camfield, L. (2007). Studies on the diatom genus *Stenopterobia* (Bacillariophyceae) including descriptions of two new species. *Canadian Journal of Botany*, 85(1), 822-849.
- Steinhilber, F. y Beer, J. (2011). Solar activity-the past 1200 years. *Pages News*, 19(1), 5-6.
- Stuiver, M. y Reimer, P. (1993). Extended ¹⁴C database and revised CALIB radiocarbon calibration program, *Radiocarbon*, 35(1): 215-230.
- Solak, C., Barinova, S., Acs, E., y Dayioğlu, H. (2012). Diversity and ecology of diatoms from Felent creek (sakarya river basin), Turkey. *Turkish Journal of Botany*, 36(2), 191-203.
- Sommaruga, R. (2001). The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lakes. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 62(1-2), 35-42.
- Souffreau, C., Vanormelingen, P., Van de Vijver, B., Isheva, T., Verleyen., E., Sabbe., K. y Vyverman, W. (2013). Molecular Evidence for Distinct Antarctic Lineages in the Cosmopolitan Terrestrial Diatoms *Pinnularia borealis* and *Hantzschia amphioxys*. *Protist*, 164(1), 101-115.
- Spaulding, S. y Edlund, M. (2009). *Chamaepinnularia*. En: Diatoms of the United States. Recuperado de <http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/genus/Chamaepinnularia>.
- Spaulding, S., y Edlund, M. (2009). *Pinnularia*. En: Diatoms of the United States. Recuperado de <http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/genus/Pinnularia>
- Spaulding, S., Lubinski, D., y Potapova, M. (2010). En: Diatoms of the United States. Recuperado de <http://westerndiatoms.colorado.edu>
- Taurai, B. Mangadze, T. y Tongayi, M. (2014). The application and testing of diatom-based indices of stream water quality in Chinhoyi Town, Zimbabwe. *Department of Wildlife and Safari Management. Journal Home*, 40(3), 503-512.
- Téllez, B. y Schillizzi, R. (2002) Asociaciones de Diatomeas en Paleoambientes Cuaternarios de la Costa Sur de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Pesquisas en Geociencias*, 29(1), 59-70.
- Tinner, W. & Lotter, A. (2001). Central European vegetation response to abrupt climate change at 8.2 ka. *Geology*, 29 (6), 551-554.
- Tremarin, P., Thelma, A. y Torgan, L. (2014). Four new *Aulacoseira* species (*Coscinodiscophyceae*) from Matogrossense Pantanal, Brazil. *Diatom Research*, 29(2) 183-199.

- Unrein, F., Izaguirre, I., Massana, R., Balagué, V. y Gasol, J. (2005). Nanoplankton assemblages in maritime Antarctic lakes: characterization and molecular fingerprinting comparison. *Aquatic Microbial Ecology*, Vol. 40(1), 269-282.
- Uriarte, A. (2010). *Historia del clima en la Tierra*. 2da edición, disponible en <http://www.elkar.com>
- Van Kerckvoorde, A., Trappeniers, K., Nijs, L. y Beyens, L. (2000). Terrestrial soil diatom assemblages from different vegetation types in Zackenberg (Northeast Greenland). *Polar Biology*, 23(6), 392-400.
- Van de Vijver, B. y Beyens, L. (1997). The epiphytic diatom flora of mosses from Strømness Bay area, South Georgia. *Polar Biology*: 17(6), 492-501.
- Van de Vijver, B., Beyens, L., Vincke, S. y Gremmen, N. (2004). Moss-inhabiting diatom communities from Heard Island, sub-Antarctic. *Polar Biology*: 27(9), 532-543.
- Van de Vijver, B (2008). *Pinnularia obaesa* sp. Nov. And *P. Australorabenhorstii* sp. Nov., two new large *Pinnularia* (sect. Distantes) from the Antarctic king George island (South Shetland Islands). *Diatom Research*, 23(1), 221-232.
- Vázquez-Selem, L. (2003). El escenario paleoambiental de la región. En: Velázquez, A., Torres, A., Y Bocco, G. *Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo de recursos naturales*. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Mexico.
- Vázquez-Selem, L. (2004). Investigaciones de los glaciares y del hielo de los polos. En *Cambio Climático una visión desde México*, México.
- Vázquez-Selem, L. y Heine, K. (2011). Late Quaternary glaciation of México. En Ehlers, J. et al. (Eds.), *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology. A closer look*. Amsterdam, Elsevier, 849-861.
- Vela, L., Boyas, A., Hernández, A., Mancera, O. y Rodríguez, A. (1976). El Nevado de Toluca. *Ciencia Forestal*, 1(4), 53-61.
- Vélez, M., Hooghiemstra, H. y Metcalfe, S. (2005). Fossil and modern diatom assemblages from the savanna lake el piñal, Colombia: an environmental reconstruction. *Diatom Research*, 20(2), 387-407.
- Wetzel, C., Lobo, E., Oliveira, M., Bes, D., y Hermany, G. (2002). Diatomáceas epilíticas relacionadas a fatores ambientais em diferentes trechos dos Rios pardo e pardinho, bacia hidrográfica do rio pardo, rs, Brasil: resultados preliminares. *Caderno de Pesquisa Série Biologia*, 14(2), 17-38.
- Wetzel, R. (1981). *Limnología*, Omega, Barcelona.
- Whitmore, T., (1989). Florida diatom assemblages as indicators of trophic state and pH. *Limnology and Oceanography*, 34(5), 882-892.
- Wiersma, A. y Renssen, H. (2006). Model-data comparison for the 8.2 ka BP event: confirmation of a forcing mechanism by catastrophic drainage of Laurentide Lakes. *Quaternary Science Reviews* 25(1-2), 63-88.
- Wojtal, A., Witkowski, A. y Metzeltin, D. (1999). The diatom flora of the "Bor na Czerwonem" raised peat-bog in the Nowy Targ Basin (Southern Poland). *Fragmenta Floristica et Geobotanica*, 44(1): 16-192.
- Yarza de la Torre, E. (1992). *Volcanes de México*. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.

- Zalasiewicz, J., Williams, A., Smith, T., Barry, A., Coe, P., Bown, P., Brechely, D., Cantrill, A., Gale, P., Gibbard, F., Gregory, M., Hounslow, A., Kerr, P., Pearson, R., Knox, J., Powell, C., Waters, J., Marshall, M., Oates, P., Rawson y Stone, P. (2008). Are we now living in the Anthropocene?. *GSA Today*, 18(2), 4-8.
- Zampella, R., Laidig, K. y Lowe, R. (2007). Distribution of Diatoms in Relation to Land Use and pH in Blackwater Coastal Plain Streams. *Journal of Environmental Management*, 39(1), 369-384.
- Ziller, S. y Economou-Amilli, A. (1998). Freshwater algae from lakes in the lower Niger Delta system (Nigeria). *Hydrobiologia*, 368(1), 217-229.
- Zong, Y. y Horton, B. (1998). Diatom zones across intertidal flats and coastal saltmarshes in Britain. *Diatom Research*, 13(2), 375-394.