



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

ESTUDIO PALEOLIMNOLÓGICO CON  
BIOINDICADORES AMBIENTALES: DIATOMEAS,  
AMEBAS TESTADAS Y QUIRONÓMIDOS EN LOS  
LAGOS DE ALTA MONTAÑA “EL SOL” Y “LA LUNA”,  
NEVADO DE TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO,  
MÉXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**BIÓLOGA**

P R E S E N T A:

JOANNA FERNANDA MORENO FERNÁNDEZ



DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. MARGARITA CABALLERO MIRANDA

2022  
Ciudad Universitaria, CD. MX.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos de la alumna:

Moreno  
Fernández  
Joanna Fernanda  
(55) 69697260  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
312062853

2. Datos de la tutora:

Dra.  
Margarita Erna  
Caballero  
Miranda

3. Datos de Sinodal 1:

Dr.  
Eberto  
Novelo  
Maldonado

4. Datos de Sinodal 2:

Dra.  
Elsa  
Arellano  
Torres

5. Datos de Sinodal 3:

Dra.  
Esperanza  
Torres  
Rodríguez

6. Datos de Sinodal 4:

Dra.  
Itzel  
Sigala  
Regalado

Datos del trabajo escrito:

Estudio paleolimnológico con bioindicadores ambientales: diatomeas, amebas testadas y quironómidos en los lagos de alta montaña “El Sol” y “La Luna”, Nevado De Toluca, Estado De México, México. 87 p, 2022.

[...]

Los largos paisajes que el viento prefigura,  
la distancia tan breve entre el sol y la espuma,  
la sombra de la flor, el tacto:

la materia es visible.

Las manos cobijan el espacio  
y lo imaginan. Pueden mirar también  
la historia de las piedras.

Alguna vez los ojos tocan al fin el borde de las cosas y  
siguen su camino con una luz distinta,  
apenas distinguible.

Sólo si canta es plenitud la boca; sí acomoda  
el sonido volverlo almohada  
es beso.

Un fresno para escuchar la noche.  
La risa, para beber del agua.

Visible es la materia.

[...]

Malva Flores

*A mis padres por su apoyo siempre presente.*

*A mis abuelitos Gloria y Miguel, que siempre  
me impulsan a ser mejor cada día, por el gran  
cariño que me dan siempre y el ejemplo que  
persistentemente me han dado.*

*Para Bere, Lupita y Merlina que ahora son  
una estrella más en el cielo*

## Agradecimientos Académicos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a los maestros que me han acompañado en esta vida como estudiante y que me han dado las herramientas para poder desarrollarme académica y personalmente.

Con mucho cariño agradezco a la Dra. Margarita Caballero Miranda, por todas las enseñanzas y la confianza que me ha brindado en los años que llevo trabajando con ella, por cada lección, comentario y correcciones que realizó en este trabajo. Por toda la energía, pasión y exigencia que me transmitió al hacer este trabajo, en el servicio social y en otros proyectos.

A la Dra. Julieta Massafarro, a quien admiro por su trabajo y colaboración, con mucho afecto le agradezco todas las atenciones y asesoría que me brindó en el trabajo taxonómico que se realizó con los quironómidos, así como el gusto por estudiarlos.

Con estima a la Dra. Itzel Sigala Regalado, quién contribuyó con sus comentarios y correcciones que enriquecieron mi trabajo y mi vida académica. Por su ayuda con la identificación de amebas testadas. Además, por enseñarme el mundo microscópico de las amebas testadas con una gran dedicación.

Al todas las Dras. del taller Sistemas Acuáticos y Cambio Climático, que me brindaron muchos conocimientos sobre la paleolimnología y oportunidades para desarrollarme académicamente.

A la bióloga Katia Mireya Vega Flores por su tiempo, trabajo y colaboración con la búsqueda de información, para enriquecer la base de datos e interpretación ecológica de amebas testadas.

Al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México y al laboratorio de Paleolimnología, lugar donde pude desarrollar este trabajo.

A la Sra. Aida, por todo el apoyo en el laboratorio.

Al equipo de trabajo del Dr. Luis Oseguera, por todo el apoyo en las salidas a campo.

## Agradecimientos Personales

A mis padres, Josefina y Miguel, quienes me han brindado todas las oportunidades para que yo continúe realizando mis sueños, por alentarme a continuar en este camino de la ciencia y a no rendirme. Por estar alentándome a siempre superarme y continuar, gracias por todo su apoyo y paciencia que me han tenido en este proceso. Los amo. A mis hermanos Jessi, Chema y Leo, porque siempre están acompañándome, haciendo de mi vida una aventura, por ser mi luz cuando más los necesito.

Con amor a mis abuelitos Gloria y Miguel, que me han enseñado lo valioso de la vida y a disfrutar de ella, por su apoyo incondicional en muchos momentos de mi vida y en mi desarrollo académico. A mis abuelitos Rafita y Víctor, ya que su cariño y apoyo han sido constantes para mí.

A mis tías Talina, Indira, Lupe, Ale, Alma y mis tíos Iván y Carlos por sus ánimos. A mis primas Ale, Natt, Ginna, Katt, Valito, Jenny, Nashe y Andy, quienes siempre me han apoyado, alentado y regalado muchos momentos felices.

A mis amigos Carlos, Jair y Nachito, Piche por ser mis compañeros y escucharme en todo momento, por todas las carcajadas que me sacaron y su apoyo emocional. Así como a mis amigas, Danni, Iris y Carmen, que siempre su compañía y consejos me ayudaron a superar dificultades.

A mis compañeras y amigas de la facultad, Pau, Hokita, Maru, Bero, Dania, Era, Brens, Vero, Yuri, por todas las prácticas de campo que pudimos vivir y compartir. Gracias por todas las aventuras y brindarme su apoyo durante la carrera.

A mis compañeras de laboratorio Mon, Alex, Mireya, Wenns, Dianita, Lupita y Marco quienes vivieron de cerca conmigo el realizar este trabajo, gracias por sus consejos, sugerencias, apoyo y risas en el laboratorio.

En especial agradecimiento a mi amiga Monserrat Villafuerte Bazaldua, quien fue mi compañera pandémica y de apoyo en este proceso final de ser tesista y con todos los trámites en el inglés, por escucharme y hacer de mi fortaleza algo inquebrantable, te quiero mucho mi Mon.

## CONTENIDO

	Pág.
	1
<b>Resumen</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	3
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b>	5
<b>3. OBJETIVOS</b>	6
<b>4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN</b>	7
<b>5. MARCO TEÓRICO</b>	8
5.1. Diatomeas	8
5.2. Amebas testadas	11
5.3. Quironómidos	13
<b>6. ANTECEDENTES</b>	17
<b>7. ÁREA DE ESTUDIO</b>	19
7.1. Geología y geomorfología	19
7.2. Clima	20
7.3. Vegetación	20
7.4. Limnología de los lagos “El Sol” y “La Luna”	23
<b>8. METODOLOGÍA</b>	25
8.1. Trabajo de campo	25
8.2. Trabajo de laboratorio	25
8.3. Análisis de diatomeas	25
8.4. Análisis de amebas testadas y quironómidos	27
8.5. Análisis numéricos	29
<b>9. RESULTADOS</b>	32
9.1. Marco cronológico	32
9.2. Registro paleolimnológico de los lagos “El Sol” y “La Luna”	33
9.2.1. Diatomeas	33
9.2.2. Amebas testadas	41
9.2.3. Quironómidos	45
9.3. Análisis ecológicos	48
<b>10. DISCUSIÓN</b>	51
10.1. Registro paleolimnológico de los lagos “La Luna” y “El Sol”	51
10.1.1. Diatomeas del lago “El Sol”	51
10.1.2. Diatomeas del lago “La Luna”	53
10.1.3. Riqueza y Diversidad de diatomeas en los lagos “La Luna” y “El Sol”	54
10.1.4. Amebas testadas del lago “La Luna”	55
10.1.5. Registro paleolimnológico lago “La Luna”	57
10.1.6. Quirónomidos del lago “La Luna”	59
<b>11. CONCLUSIONES</b>	61
<b>12. LITERATURA CITADA</b>	64
<b>13. ANEXOS</b>	75



## LISTADO DE FIGURAS

Figuras	Título	Pág.
Figura 1.	Estructuras principales de una célula de diatomea.	9
Figura 2.	Ciclo de vida de las diatomeas, reproducción asexual y sexual.	10
Figura 3.	Esquema de las estructuras principales de amebas testadas.	11
Figura 4.	Ciclo de vida de quironómidos	14
Figura 5.	Mapa del área de estudio.	22
Figura 6.	Gráficas de actividad total de $^{210}\text{Pb}$ y estimación cronológica calculada.	33
Figura 7.	Gráfica de abundancias relativas (%) de diatomeas en el lago "El Sol".	38
Figura 8.	Gráfica de la concentración de diatomeas del lago "La Luna".	39
Figura 9.	Micrografías de microscopía de barrido de los principales <i>taxa</i> de diatomeas halladas en los lagos "El Sol" y "La Luna".	40
Figura 10.	Micrografías en microscopio óptico compuesto de los principales <i>taxa</i> de diatomeas halladas en los lagos "El Sol" y "La Luna".	41
Figura 11.	Gráfica de la concentración de amebas testadas del lago "La Luna".	43
Figura 12.	Micrografías de microscopía electrónica de barrido de amebas testadas identificadas en el lago "La Luna".	43
Figura 13.	Fotografías en microscopio óptico compuesto de amebas testadas identificadas en el lago "La Luna".	44
Figura 14.	Gráfica de la concentración de diatomeas, amebas testadas y quironómidos registradas en el lago "La Luna".	46
Figura 15	Fotografías en microscopio óptico compuesto de cápsulas cefálicas y algunas estructuras principales de quironómidos.	47
Figura 16	Mapa de calor que representa los resultados del análisis modo Q y R con los taxones de amebas testadas.	50
Figura 17	Tasa de sedimentación del lago "La Luna".	57

## LISTADO DE TABLAS

Tabla	Título	Pág.
Tabla 1.	Características principales morfométricas, físicas, químicas y tróficas de los lagos “El Sol” y “La Luna”.	24
Tabla 2.	Lista taxonómica de los taxones hallados en los lagos “El Sol” y “La Luna”.	34
Tabla 3.	Lista taxonómica de los taxones de amebas testadas halladas en el lago “La Luna”.	42
Tabla 4.	Lista taxonómica de quironómidos en los sedimentos del lago “La Luna”.	45
Tabla 5.	Índice de la riqueza específica (S), Diversidad Shannon- Wiener (H') y Diversidad verdadera (D) de las diatomeas y amebas testadas en el lago “La Luna” y “El Sol”	49

## ANEXOS

Número de anexo	Título	Pág.
1	Tabla de conteos y abundancia relativa de diatomeas en el lago “El Sol”.	75
2	Tabla de conteos y concentración de diatomeas en el lago “La Luna”.	79
3.	Tabla de conteos y abundancia relativa de amebas testadas en el lago “La Luna”.	82
4.	Tabla de conteos y abundancia relativa de quironómidos en el lago “La Luna”.	84
5.	Artículo First record of the <i>Pseudodiamesa branickii</i> species group (Diptera: Chironomidae: Diamesinae) from central Mexico.	85

## Resumen

Se realizó un estudio paleolimnológico de alta resolución en los lagos de alta montaña “El Sol” y “La Luna”, con el objetivo de evaluar evidencias de cambios recientes en las condiciones ambientales de ambos lagos, por medio del uso de tres grupos de bioindicadores ambientales, diatomeas, amebas testadas y quironómidos. Estos lagos se seleccionaron por ser los únicos lagos de alta montaña en México, y considerando que este tipo de lagos presenta una baja capacidad de amortiguación ante perturbaciones naturales y antropogénicas, por lo que se consideran excelentes monitores de cambio global.

Se recuperaron dos núcleos cortos paralelos de sedimento en cada lago, datado una secuencia de cada uno con  $^{210}\text{Pb}$  para establecer un marco cronológico. De éstos, se analizaron los diez primeros centímetros. En el caso del lago “El Sol”, sólo se estudió el registro de diatomeas, mientras que en el lago “La Luna” se estudiaron las diatomeas, las amebas testadas y los quironómidos.

Los resultados del análisis de  $^{210}\text{Pb}$ , mostraron que el sedimento analizado en “La Luna”, abarca los años 1959 a 2013, mientras que la edad en el lago “El Sol” los años de 1938 a 2013.

Las diatomeas preservadas en los sedimentos del lago “El Sol”, incluyeron 30 especies, entre las cuales destacó la presencia en baja abundancia de *Discostella stelligera*, *Nitzschia palea* y tres especies de la familia Staurosiraceae que se consideran indicadoras de perturbación reciente. En el lago “La Luna” se identificaron 18 especies reportadas en estudios previos. En el caso de amebas testadas, se identificó un total de 5 *taxa* de las cuales, *Diffugia glans* var. “glans” y *Diffugia globulosa*, *Diffugia oblonga* var. “oblonga” y *Centropyxis constricta* var. “aerophila” se reportan por primera vez en el lago “La Luna”. Se identificó un *taxa* de quironómido, que corresponde al género *Pseudodiamesa* (grupo de *P. branickiide*), que es reportado por primera vez en México y posiblemente sea una nueva especie.

En este estudio paleolimnológico, se concluye que, en el lago “El Sol” se identificó un posible aumento en la concentración de nutrientes, con base en la presencia de las especies de diatomeas *D. stelligera*, *N. palea* y el ensamble de Staurosiraceae. Dicho aumento pudo ser consecuencia de las actividades humanas anteriores al año ~1940. En lo referente al lago “La Luna”, se reconocieron cambios importantes en la comunidad de diatomeas y amebas testadas en los últimos 50 años, donde se documentaron cambios ecológicos que podrían estar relacionados con el incremento en la tasa de sedimentación en el lago.

## 1. INTRODUCCIÓN

La paleolimnología emplea la información física, química y biológica conservada en los perfiles sedimentarios de los lagos para reconstruir las condiciones limnológicas pasadas, así como los cambios que han ocurrido fuera de este. Las tasas de sedimentación en los lagos son a menudo altas, por lo que sus sedimentos ofrecen el potencial de preservar un registro de alta resolución de los cambios ambientales pasados (Smol, 2017; Bradley, 2015; Dixit *et al.*, 1992).

El estudio de las condiciones limnológicas y ambientales del pasado se lleva a cabo a través del estudio de diversos tipos de indicadores que se preservan en los sedimentos lacustres, entre ellos los biológicos, también conocidos como bioindicadores, entre los que destacan: plantas, granos de polen, diatomeas, crisofitas e insectos (Holt y Miller, 2010; Smol, 2017). Los bioindicadores son empleados en estudios paleolimnológicos, ya que presentan estructuras resistentes a la degradación, las cuales les permite que se preserven en el registro sedimentario lacustre. Además, son organismos que tienen una alta sensibilidad a los cambios físicos y químicos del ambiente, como la concentración total de fósforo, la temperatura, el pH, la salinidad, etc. (Pérez *et al.*, 2012; Cohen, 2003).

Los lagos de alta montaña son cuerpos de agua que se definen por estar situados en altitudes por arriba de la línea arbórea. Sus cuencas hidrográficas son relativamente pequeñas y en su mayoría sus aguas presentan una baja conductividad ( $<100 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) y un pH neutro a ácido. Por lo general, son lagos polimícticos y la temperatura máxima del agua suele permanecer por debajo de los 20 °C. Sus aguas son transparentes, con alta penetración de luz en la columna de agua y una biomasa fitoplanctónica limitada (Catalan, *et al.*, 2009; Catalan & Rondón, 2016).

Los lagos de alta montaña que se encuentran en zonas tropicales se pueden clasificar en lagos de páramo, localizados aproximadamente entre 3200 y 4500

m.s.n.m., y en lagos glaciales, si se ubican en altitudes mayores, donde el suministro de agua es directamente por fusión de glaciares (Cartuche *et al.*, 2019). Cabe destacar que estos lagos se encuentran en áreas alejadas de las zonas pobladas, experimentando una mínima actividad humana directa en sus cuencas, por lo que son sistemas relativamente no contaminados en comparación con los lagos de altitudes bajas. Son considerados áreas de convergencia regional de contaminantes atmosféricos, dada su elevada ubicación. Por lo tanto, este tipo de ecosistemas se ven afectados por los cambios en la química de la atmósfera, debido a una amplia gama de emisiones de productos químicos, tanto en forma de gases como de aerosoles, que son transportados largas distancias (Curtis *et al.*, 2005; Battarbee *et al.*, 2002; Camarero, 2017).

En este proyecto de investigación se realizó un estudio paleolimnológico de alta resolución en dos lagos de alta montaña, “El Sol” y “La Luna”, ambos dentro del cráter del volcán Nevado de Toluca. Estos ecosistemas son únicos en México, por lo que es elemental conocer su biología y ecología. Por lo tanto, en este estudio se tiene como objetivo evaluar si existen evidencias de cambios recientes en las condiciones ambientales, mediante el uso de diatomeas como bioindicadores de las condiciones lacustres. Además, para el lago “La Luna”, se emplea el uso de otros dos grupos de bioindicadores: amebas testadas y quironómidos, los cuales no se han estudiado con anterioridad en los sedimentos de este lago.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Los lagos “El Sol” y “La Luna” localizados dentro del cráter del Volcán Nevado de Toluca, son los únicos lagos de alta montaña en México. Representan ecosistemas que, por sus características, tienen una escasa capacidad de amortiguamiento ante perturbaciones naturales y antropogénicas, por lo que representan sitios ideales para evaluar el impacto en los ecosistemas ante el cambio ambiental reciente (Catalan *et al.*, 2006).

Asimismo, de acuerdo con Catalan y Rondón (2016) la mayoría de los estudios en lagos de alta montaña se han realizado en zonas templadas del planeta, por lo que existe escasa información acerca de los lagos de alta montaña en áreas tropicales. Los lagos “El Sol” y “La Luna”, ubicados en el límite sur de la región Neártica y su transición al Neotrópico (Dimas-Flores *et al.*, 2008). Por ello, el estudio de estos lagos contribuye de manera relevante a comprender los procesos ecológicos en este tipo de ecosistemas y sus respuestas ante los cambios ambientales pasados y actuales. Estos lagos se localizan en una zona catalogada, desde 2013, como Área de Protección de Flora y Fauna (APFF), reconocida por la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEGEEPA) (Diario Oficial de la Federación 2016; Ceballos, 2013).

Cabe destacar, que dentro del plan de manejo no se hace mención específica sobre la protección de los lagos, para evitar su deterioro o contaminación (Mastretta-Yanes *et al.*, 2013; Depraz *et al.*, 2017). Realizar estudios de diversas disciplinas científicas para conocer la dinámica de estos lagos y determinar si éstos han sido afectados por impacto antropogénico asociado con el turismo, el cambio climático, el transporte de contaminantes atmosféricos, etc. Es fundamental conocer las condiciones ecológicas de estos lagos mediante estudios limnológicos y paleolimnológicos, e identificar si existen tendencias de cambio recientes que pudieran estar poniendo en riesgo su valor biológico y cultural.

### 3. OBJETIVOS

#### Objetivo general

- I. Realizar un estudio paleolimnológico de alta resolución con la finalidad de evaluar si existen evidencias de cambios recientes (~50 años) en las condiciones ambientales de los lagos “La Luna” y “El Sol”, en el volcán Nevado de Toluca Edo. Méx., mediante el uso de 3 grupos de bioindicadores: diatomeas, amebas testadas y quironómidos.

#### Objetivos particulares

- I. Identificar las especies de diatomeas preservadas en los sedimentos acumulados en el lago “El Sol”, reconociendo si hay cambios importantes en las comunidades de estos organismos, que sugieran cambios recientes en la ecología del lago.
- II. Identificar las especies de diatomeas, amebas testadas y quironómidos preservados en los sedimentos acumulados en el lago “La Luna”, reconociendo si hay cambios importantes en las comunidades de estos organismos que sugieran cambios en la ecología del lago.
- III. En caso de observar cambios significativos en la concentración y asociaciones de bioindicadores, inferir las posibles causas que pudieran haber dado origen a los cambios en las comunidades de bioindicadores en cada lago.
- IV. Explorar y estudiar la preservación de amebas testadas y quironómidos en los sedimentos del lago “La Luna”.



#### 4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Se han presentado cambios importantes en las poblaciones de diatomeas en los últimos ~50 años en el lago “El Sol” y “La Luna” que sugieran cambios en el pH o el nivel trófico de sus aguas?
- ¿Cuáles son las especies y la diversidad de amebas testadas y quironómidos característicos del lago “La Luna” actualmente?
- ¿Existe una buena preservación de amebas testadas y quironómidos en los sedimentos del lago “La Luna”? De ser así, ¿han existido cambios importantes en estos organismos en el pasado reciente que sugieran cambios importantes en la ecología de este lago?
- ¿Cuál es la composición de especies de diatomeas recientes en los lagos “El Sol” y “La Luna”? ¿Se mantienen las diferencias en la diversidad y composición de diatomeas entre los lagos “La Luna” y “El Sol” que fueron reportadas en estudios previos? ¿Hay diferencias significativas en la diversidad de diatomeas entre ambos lagos?

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1 Diatomeas

Las diatomeas (*Bacillariophyceae*) son algas unicelulares cuyo tamaño puede variar entre 5 y 200  $\mu\text{m}$ ; se caracterizan por ser organismos fotosintéticos que presentan cloroplastos con un tono especial, pardo-dorado, el cual se debe a la presencia de pigmentos como la fucoxantina,  $\beta$ -carotenos, clorofila *a*, y clorofila *c* (Molino y Wetherbee, 2008; Caballero *et al.*, 2013; Mann *et al.*, 2016).

La morfología de las diatomeas se caracteriza principalmente por una pared celular impregnada de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) muy ornamentada, denominada frústulo. El frústulo consta de dos valvas superpuestas de diferente tamaño, llamadas hipovalva y epivalva. Por otro lado, el cingulo, que consta de una serie única o de múltiples bandas de sílice, une las dos valvas (Figura 1) (Molino y Wetherbee, 2008; Battarbee *et al.*, 2001).

Las diatomeas se reproducen vegetativamente (asexual) (Figura 2), cuando dos células hijas se forman a partir de una célula madre por mitosis (Kale y Karthick, 2015). Durante la mitosis, se forman nuevas valvas dentro de las existentes, iniciando con una estructura citoplasmática unida a la membrana, denominada vesícula de deposición de sílice (SDV, por sus siglas en inglés *Silica Deposition Vesicle*) (Sterrenburg *et al.*, 2007). Una célula hija utiliza la epiteca de la célula madre como una guía de tamaño para generar una nueva hipoteca, mientras que otra célula hija, utiliza la hipoteca, que se convierte en la epiteca de la célula hija (Zurzolo y Bowler, 2001). Por dicho procedimiento el tamaño medio de las células suele disminuir con sucesivas divisiones y así existe toda una gama de variaciones de tamaño y forma en una población (Kale & Karthick, 2015). Por otro lado, el tamaño se restaura después de la reproducción sexual, la cual se lleva a cabo mediante la formación de una auxospora, una célula especializada que se forma después de la fusión de los gametos, la auxospora se expande, restaurando el tamaño y forma característica de la especie. (Figura 2) (Kale & Karthick, 2015;

Battarbee *et al.*, 2001). Cabe destacar, que la división celular no se lleva a cabo a menos que haya suficiente sílice bio-disponible (Zurzolo y Bowler, 2001).

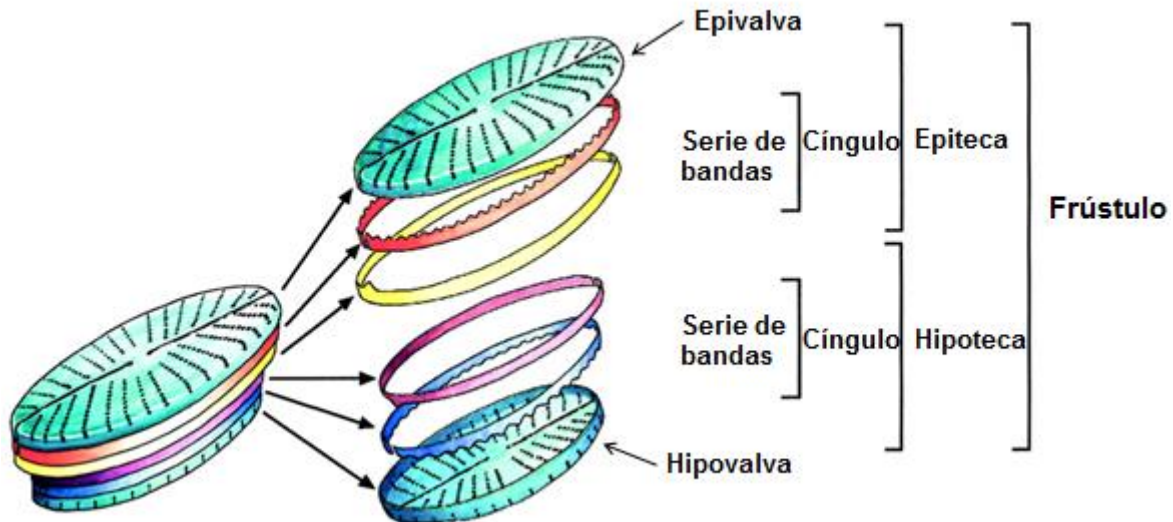


Figura 1. Estructuras que componen el frústulo de una diatomea.  
(Tomado y modificado de Zurzolo & Bowler, 2001).

La taxonomía de las diatomeas está basada, principalmente, en la forma, simetría y ornamentación de la pared celular silíceica, por lo que para su estudio con frecuencia las muestras deben de haberse limpiado antes de ser observadas en microscopía óptica (Battarbee *et al.*, 2001 Dixit *et al.*, 1992).

Las diatomeas son los principales constituyentes de las comunidades de algas bentónicas y planctónicas de todo el mundo, en hábitats terrestres, de agua dulce y marinos (Mann & Droop, 1996), además son importantes productores primarios, por lo que se encuentran en la base de las cadenas de alimentación de muchos sistemas acuáticos (Cohen, 2003).

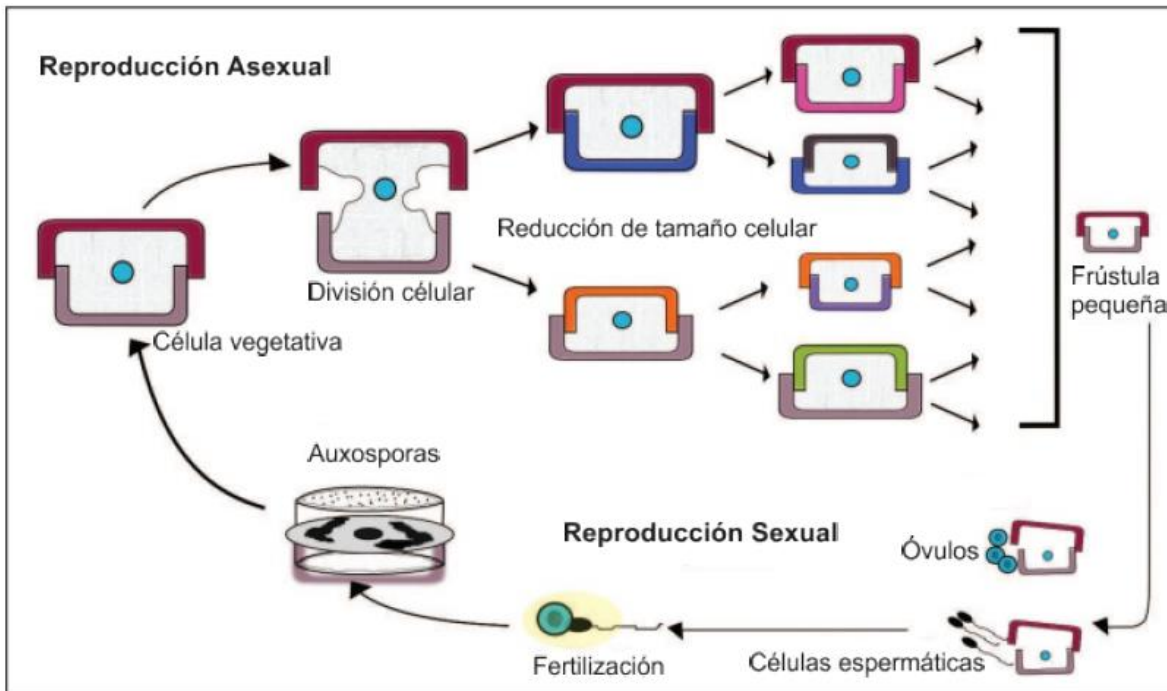


Figura 2. Representación esquemática del ciclo de vida de las diatomeas, reproducción asexual y sexual. (Tomando y modificado de Kale & Karthick, 2015).

Las especies de diatomeas tienen óptimos y tolerancias estrechas para muchas variables ambientales, por lo que responden rápidamente al cambio ambiental, ya que se distribuyen y reproducen rápidamente (Dixit *et al.*, 1992). Por lo tanto, se han empleado para realizar estudios paleoclimáticos y reconstrucciones de variables fisicoquímicas del agua, tales como conductividad eléctrica, pH, salinidad y nutrientes que a su vez son un reflejo de las condiciones ambientales locales como el clima, tasa de erosión, etc. (Cohen, 2003).

## 5.2 Amebas testadas

Las amebas testadas (también denominadas tecamebas o arcellinidos) son protozoarios ameboides unicelulares, que pueden llegar a medir entre 5 - 300  $\mu\text{m}$ . Son organismos que presentan un citoplasma que está encerrado dentro de una testa externa, la cual se caracteriza por presentar una apertura oral denominada pseudostoma, de esta apertura sobresalen pseudópodos para la locomoción y la alimentación, (Figura 3) (Ogden y Hedley, 1980; Charman, 2001; Smith *et al.*, 2007).

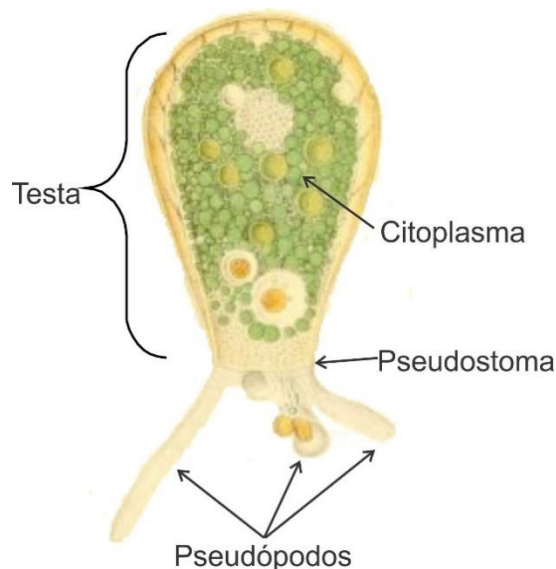


Figura 3. Representación esquemática de las estructuras principales de una ameba testada (Tomado y modificado de Leidy, 1879).

Dentro de este grupo la estructura y composición de la testa es un carácter clave para la taxonomía, la cual puede tener una gran diversidad de morfologías que permiten identificarlas a nivel de especie o variedad (Beyens y Meisterfeld, 2001; Mitchell *et al.*, 2008).

Las testas pueden ser xenogénicas o autogénicas y presentan varios tipos de composición. Las testas xenogénicas están compuestas principalmente de partículas derivadas del medio en el que viven, como pequeños granos de sílice, detritos como polen, diatomeas o partículas de minerales (granos de arena). Cabe

destacar que, dichas partículas se fijan gracias a una matriz de composición variable (Ogden y Hedley, 1980; Charman, 2001; Beyens y Meisterfeld, 2001). Las testas autogénicas están compuestas de materiales producidos por las amebas parentales en la reproducción, como placas superpuestas preformadas y de forma regular que suelen ser redondas u ovaladas. Aunque algunas testas no tienen placas y están formadas completamente por una secreción proteica suave (Charman, 2001).

La reproducción de las amebas testadas se lleva a cabo por división simple, por replicación del progenitor mediante fisión binaria, para formar una célula hija idéntica y el progenitor construye una testa completamente nueva, posteriormente se divide dejando una mitad del núcleo y citoplasma dentro de esta estructura (Ogden y Hedley, 1980; Charman, 2001). La tasa de reproducción de las amebas testadas es rápida, llevándose a cabo en días (Patterson *et al.*, 2013).

Estos organismos tienen una alimentación diversa, muchas especies consumen presas fácilmente disponibles, por lo que su dieta puede variar según la estación y el hábitat. Sin embargo, se ha documentado que se alimentan de bacterias, algas, amebas, hongos, ciliados y micrometazoarios (Smith *et al.*, 2007; Nikolaev *et al.*, 2005).

Las amebas testadas con pseudópodos tipo lobópodos se encuentran dentro del orden Arcellinida, el mayor grupo de amebas testadas que comprende actualmente 687 especies nominales. Dicho orden exhibe una amplia gama de formas de testas y muchas especies muestran una considerable variación intraespecífica en el tamaño y forma de la testa (Kosakyan *et al.*, 2016; Smith *et al.*, 2007). La clasificación más reciente considera al orden Arcellinida como monofilético, dividido en tres subórdenes: Arcellinina, Diffugiina y Phryganellina (Nikolaev *et al.*, 2005). Se ha hipotetizado que los ancestros de las amebas testadas eran probablemente marinos, lo que sugiere un cambio a las formas terrestres y de agua dulce durante su evolución (Smith *et al.*, 2007).

Estos organismos están presentes en casi todo el mundo aunque algunas amebas testadas tienen una distribución geográfica restringida (Beyens y Meisterfeld, 2001; Smith *et al.*, 2007). Están presentes en un amplio rango de ambientes, habitando en casi todos los sustratos de hábitats terrestres húmedos y de agua dulce, como musgos, turbas, lagos, marismas, agua estancada, etc. (Ogden y Hedley, 1980; Beyens y Meisterfeld, 2001; Charman, 2001).

Las amebas testas son frecuentemente estudiadas como indicadores ambientales y paleoambientales. Son muy útiles para ello, debido a su alta abundancia, diversidad de especies, a su sensibilidad a cambios en las variables ambientales, y a su buena preservación en los sedimentos (Charman y Warner, 2008; Charman, 2001; Escobar *et al.*, 2008).

### **5.3 Quironómidos**

Los fósiles de insectos se encuentran comúnmente en depósitos sedimentarios, como sedimentos lacustres o turbas, donde sus exoesqueletos hechos de quitina (un polisacárido altamente resistente), pueden estar extremadamente bien conservados. En los estudios de sedimentos lacustres, ciertos insectos acuáticos han demostrado ser útiles en la reconstrucción paleoclimática (Bradley, 2015). Los quironómidos (Orden: Diptera; Familia: Chironomidae) son un grupo de insectos ampliamente distribuidos, con una abundancia y diversidad relativamente altas en ciertos ambientes, siendo muy sensibles a cambios ambientales (Laprida *et al.*, 2014; Bradley, 2015). Se caracterizan por ser dípteros nematóceros típicos y holometábolos.

En su historia de vida presentan cuatro etapas: huevo, larva, pupa, y adulto (Porinchua y MacDonaldb, 2003). El ciclo de vida de los quironómidos comienza con el depósito de huevos en la superficie del agua, que, generalmente se adhieren al sustrato más firme disponible. Los huevos eclosionan después de unos días o un mes. Posteriormente, comienza el desarrollo de la larva, que es principalmente acuática y presenta cuatro estadios de desarrollo (Walker, 1987, Bradley, 2015,

Laurino de Silva *et al.*, 2018 y Porinchua y MacDonaldb, 2003). El primer estadio larval comienza con un período de crecimiento hasta que eventualmente se desprende el integumento exoesquelético y se presenta una muda o ecdisis. Le siguen otros dos episodios de ecdisis y crecimiento, que definen el tercer y cuarto estadios larvales. En la madurez, la pupa se mueve hacia la superficie del agua, permitiendo la emergencia del adulto alado, que rara vez tiene una probóscide. La etapa adulta permite la dispersión y reproducción.

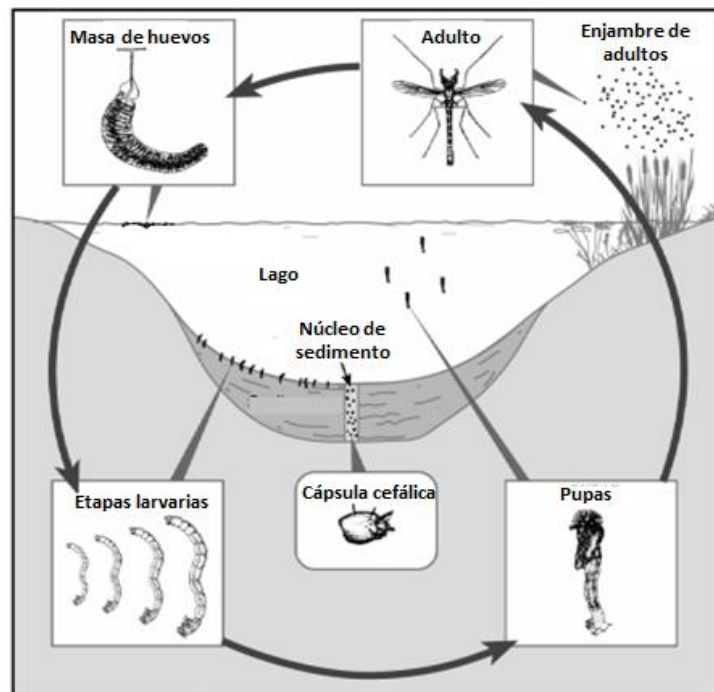


Figura 4. Ciclo de vida de quironómidos. (Tomado y modificado de Brodersen y Anderson (2000) y Porinchua y MacDonaldb (2003)).

En general, el cuerpo de la larva se caracteriza por ser alargado, cilíndrico, blando (semejante al de los gusanos) y carece de patas torácicas articuladas. Destaca la presencia de una cápsula cefálica expuesta y altamente esclerotizada, la cual es no retráctil y se caracteriza por tener partes bucales dirigidas anteriormente (prognatosas), con mandíbulas opuestas que operan en forma oblicua al plano horizontal, y ventromedialmente con una placa transversal,



generalmente dentada, llamada mentum o una lígula. Esta cápsula es resistente a la degradación y frecuentemente se preserva en los sedimentos lacustres.

La cápsula cefálica está compuesta principalmente por quitina y presenta caracteres morfológicos que permiten su identificación taxonómica. Sin embargo, para su identificación genérica es importante observar la forma de las placas ventroventrales, el mentum o lígula, siendo éstos los caracteres más importantes para su identificación (Massaferro *et al.*, 2012; Laprida *et al.*, 2014; Bradley, 2015). El mentum y la lígula son una placa con “dientes”; el tamaño, la forma, el número y la orientación de los dientes sirven para el diagnóstico (Porinchua y MacDonaldb, 2003). Aunque la estructura de las cápsulas cefálicas es variable, la mayor parte de esta variación se puede ilustrar con referencia a las subfamilias Chironominae, Orthoclaadiinae y Tanypodinae (Walker, 1987).

Los Chironomidae se dividen en once subfamilias, tres de las cuales están ampliamente distribuidas y constituyen la mayoría de los taxones encontrados en los sedimentos lacustres. Estas subfamilias son: Orthoclaadiinae, Tanypodinae y Chironominae (incluidas las tribus Chironomini, Tanytarsini y Pseudochironomini), que se encuentran en mayor abundancia y diversidad en ambientes cálidos (Eggermont y Heiri 2012; Laurino *et al.*, 2018). Por otro lado, las subfamilias Podonominae, Diamesinae, y Prodiamesinae son predominantemente estenotérmicos fríos, y se encuentran con mayor diversidad y abundancia en regiones climáticas templadas, polares y alpinas. Finalmente, las cinco subfamilias restantes (Telmatogetoninae, Chilenomyiinae, Buchonomyiinae, Usumbaromyiinae, Aphroteninaina) son bastante raras y tienen una distribución geográfica muy restringida, y por lo general son menos ricas en especies (Eggermont y Heiri 2012; Laurino *et al.*, 2018; Walker 1987).

Las investigaciones paleolimnológicas con quironómidos se basan en las cápsulas cefálicas conservadas comúnmente en los sedimentos lacustres. La conservación de las cápsulas cefálicas se debe a la composición de quitina, que las

hace resistentes a la descomposición (Porinchua y MacDonaldb, 2003; Bradley, 2015; Massaferro *et al.*, 2012; Battarbee *et al.*, 2002). Los análisis de quironómidos a lo largo de una secuencia sedimentaria se han utilizado con frecuencia para realizar reconstrucciones del estado trófico de los lagos (Porinchua y MacDonaldb, 2003; Simpson y Bode, 1980). Otra variable que también ha sido reconstruida mediante el uso de quironómidos es la temperatura, mediante funciones de calibración o transferencia (Laprida *et al.*, 2014; Holmes *et al.*, 2011).

## 6. ANTECEDENTES

En los lagos del Nevado de Toluca se han realizado estudios previos analizando la composición de diatomeas preservadas en sus sedimentos. Caballero (1996) caracterizó la flora de diatomeas de los lagos “El Sol” y “La Luna”, identificando 21 *taxa* y reportando que la flora de diatomeas de cada lago es distinta, a pesar de la cercanía física entre ellos. Para el lago “La Luna” reportó nueve especies, de las cuales sobresalen *Encyonema perpusillum*, *Navicula* NTA, *Psammothidium helveticum* y *Psammothidium levanderi*; Para el lago “El Sol”, reportó 19 especies de diatomeas, de las cuales *Cavinula pseudoscutiformis*, *Aulacoseira nivaloides* (reportada como *A. distans*) y *Psammothidium levanderi*, fueron las de mayor abundancia. Entre estas especies se incluyen dos posibles especies endémicas, *Navicula* NTA (presencialmente distribuida en “La Luna”) y *Navicula* NTB (solo presente en “El Sol”), que aún no se encuentran registradas taxonómicamente.

En cuanto a las amebas testadas, Sigala *et al.* (2015) en su estudio de lagos del centro de México, reportaron la presencia de ocho taxones, identificando en “El Sol” seis: *Arcella vulgaris*, *Centropyxis aculeata* var. “aculeata”, *Centropyxis aculeata* var. “discoides”, *Diffugia gramen*, *D. oblonga* var. “tenuis”, *Lesquereusia modesta*. Para el lago “La Luna”, identificó tres *taxa*: *Centropyxis aculeata* var. “aculeata”, *Centropyxis constricta* var. “spinosa”, *Diffugia protaeiformis* var. “amphoralis”. Además, Cuna, 2015 reportó la presencia de *Paulinella* sp. en sedimentos del lago “El Sol”.

Por otro lado, Oseguera *et al.*, 2016 reportaron la distribución espacial y temporal de la comunidad de microinvertebrados bentónicos en ambos lagos. Para el lago “La Luna” reportaron una especie de oligoqueto (*Limnodrilus hoffmeisteri*) y un quironómido (*Pagastia* sp.). En el lago “El Sol” reportaron cuatro especies de oligoquetos (*L. hoffmeisteri*, *Tubifex tubifex*, *Lumbriculus variegatus* y *Nais pardalis*), un bivalvo (*Pisidium casertanum*), un hidrozooario (*Hydra vulgaris*) y dos quironómidos (*Pagastia* sp. y *Tanytarsus* sp.). Los autores concluyen, que las

condiciones de temperatura y de pH están correlacionadas con la variación temporal de la densidad de microinvertebrados bentónicos en ambos lagos.

En cuanto a estudios paleoambientales, Hernández-Vásquez, 2016 realizó un estudio paleolimnológico de los últimos ~7,500 años cal A.P. en el lago “La Luna”, analizando la composición de diatomeas y susceptibilidad magnética. Identificó siete etapas que indican diferentes condiciones en el lago. Las condiciones lacustres en el cráter del Nevado de Toluca se establecen hace 6,000 años cal A.P.; y hace ~5,600 años cal A.P. el lago es impactado por la caída de una tefra, incrementándose la concentración de diatomeas. Desde hace ~4,500 años cal A.P. las condiciones del lago son muy similares a las actuales. Sin embargo, hacia los 600 años cal A.P., entre 1350 – 1910 d.C., se registra el impacto de los climas fríos que dominaron durante la Pequeña Edad de Hielo y que también fue documentado en el estudio realizado por Cuna *et al.*, 2014 y en el análisis de polen realizado por Ruiz-Córdova *et al.* (2019).

En los estudios paleoclimáticos *multi-proxy* (con diatomeas, cladóceros y polen) realizados por Cuna *et al.*, (2014), Cuna, (2015), y Zawisza *et al.*, (2017), se estudiaron las fluctuaciones registradas en estos lagos durante los últimos 1,800 años para el lago “El Sol” y 800 años para el lago “La Luna”. En estos trabajos se registran evidencias del impacto de la Pequeña Edad de Hielo, principalmente en el lago “La Luna”, como la disminución en el nivel lacustre y un aumento en su pH. Al finalizar la Pequeña Edad de Hielo, alrededor de 1910 d.C., hay un aumento en la precipitación restaurándose las condiciones similares a las que presenta el lago actualmente.

Cuna, 2015 y Zawisza *et al.*, 2017 enfatizan la posibilidad de un incremento en el estado trófico en el lago “El Sol”, a partir de 1950 como consecuencia de la introducción de truchas. Esto lo infieren a partir de un incremento en especies indicadoras de ambientes con mayores nutrientes como, *Discostella stelligera*. Por otro lado, en el lago “La Luna”, Cuna *et al.*, 2014 reportan que se observa una

disminución en *Navicula* NTA en las muestras más recientes (2003 y 2010). Esta especie es característica de ambientes ácidos, y su disminución pudiera sugerir un incremento en su pH. Estos estudios hacen énfasis en que en ambos lagos existen señales de un aumento en el pH y en el estado trófico, lo que traería como resultado una pérdida en las especies características de ambos lagos.

## 7. ÁREA DE ESTUDIO

### 7.1 Geología y geomorfología.

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es un arco continental andesítico que tiene aproximadamente 1,000 km de longitud y un ancho variable entre 80 y 230 km, que cruza el centro de México desde el océano Pacífico hasta el golfo de México. La actividad volcánica de la FVTM está relacionada con la subducción de las placas Cocos y Rivera debajo de la placa de América del Norte a lo largo de la trinchera de América Central (Macías *et al.*, 1997; García-Palomo *et al.*, 2000; Armienta *et al.*, 2000). La actividad volcánica asociada con la FVTM ha favorecido que haya un gran número de cuencas lacustres cerradas (Davies *et al.*, 2002).

En la parte central del FVTM se encuentran enormes estratovolcanes, entre los que destaca el volcán Nevado de Toluca (19° 09'N; 99 ° 45'W) (Figura 5). Este volcán es la cuarta cima más alta de México, con una elevación de 4,680 m.s.n.m. (Macías, 2005; Norini *et al.*, 2004). Se caracteriza por tener un cráter que es el resultado de una larga historia de erupciones que han modelado su fisonomía (Aceves-Quesada *et al.*, 2006; Arce, 2017, García-Palomo *et al.*, 2002). Tiene la forma de una herradura abierta hacia el Este (1-1.5 km de diámetro) cuyo borde lo componen restos de estructuras de cráteres más antiguos (Quesada *et al.*, 2007; Capra *et al.*, 2008; Macías *et al.*, 1997; García-Palomo *et al.*, 2000). En el interior del cráter se encuentra un domo dacítico central conocido como “El Ombligo”, el cual se originó después de la última gran erupción pliniana, la Pómez Toluca Superior, que ocurrió ~12,500 años AP (Macías 2005; Capra *et al.*, 2008; Arce *et*

*al.*, 2003; Arce, 2017; García-Palomo *et al.*, 2000). Este domo separa a los lagos denominados “El Sol” y “La Luna”, los cuales se encuentran a una elevación de 4,200 m.s.n.m. (D´Antonio *et al.*, 2008; Dimas-Flores *et al.*, 2008).

## 7.2 Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (1973), el clima del Nevado de Toluca entre los 2,000 y 2,800 m.s.n.m. es templado subhúmedo con una temperatura media anual de 4 °C., y a los 4,000 m.s.n.m. el clima es frío (E (T) Hwig) con temperatura media anual de 3.8 °C (SMN, 2019; Almeida-Leñero *et al.*, 2010; Aceves-Quesada, 1997). La precipitación anual es de 1,215 mm y la temporada de lluvias abarca de mayo a octubre siendo julio el mes más lluvioso (SMN, 2019; CONANP, 2016).

## 7.3 Vegetación

El Nevado de Toluca sostiene comunidades vegetales que varían dependiendo de la altitud, pero dominan los bosques de pino-encino, y en las zonas más elevadas los zacatonales o pastizales alpinos, así como las comunidades de páramos de altura de franca afinidad con climas fríos (CONANP, 2016).

Se ha identificado a partir de la cota de 3,000 m.s.n.m. un total de 198 especies de pteridofitas, gimnospermas y angiospermas, agrupadas en 111 géneros y 55 familias. A los 3,400 y 4,200 m.s.n.m. se localiza el bosque de *Pinus hartwegii*; entre los 3,000 y 3,500 m.s.n.m. está presente *Abies religiosa* (oyamel), la cual presenta una distribución irregular principalmente en la vertiente sur del volcán. Entre 3,050 y 3,218 m.s.n.m. se localiza a *P. montezumae* (Olivera-García y Pichardo, 2017; Díaz-Roldán, 2013). Entre los 4,000 y 4,400 m.s.n.m. domina la flora alpina, con 98 especies, pertenecientes a 29 familias y 65 géneros (Steinmann *et al.*, 2017). En todas las laderas del volcán y el cráter, las especies dominantes son *Calamagrostis tolucensis* y *Festuca tolucensis*, las cuales se mezclan con otras especies de gramíneas como *Agrostis tolucensis*, *Festuca hephaestophila*, *Trisetum*

*spicatum*, *Trisetum* aff. *angustifolium*, *Agrostis exarata*, *Muhlenbergia montana* y *Blepharoneurum tricholepsis*. En altitudes que abarcan los 4,400 m.s.n.m. hasta los 4,500 m.s.n.m. o más, en los picos y crestas que coronan la cima del volcán, se observan comunidades formadas, principalmente, por líquenes foliosos como *Umbilicaria* aff. *hirsuta*, *Rhizocarpon geographicum* y *Alectoria ochroleuca* (Olivera-García y Pichardo, 2017). También se han reportado 124 especies de hongos macromicetos, incluyendo comestibles, entre los que se encuentran, el selpanza (*Boletus edulis*), y la mazorca o mazorquita (*Morchella elata* y *Morchella conica*) (CONANP, 2016).

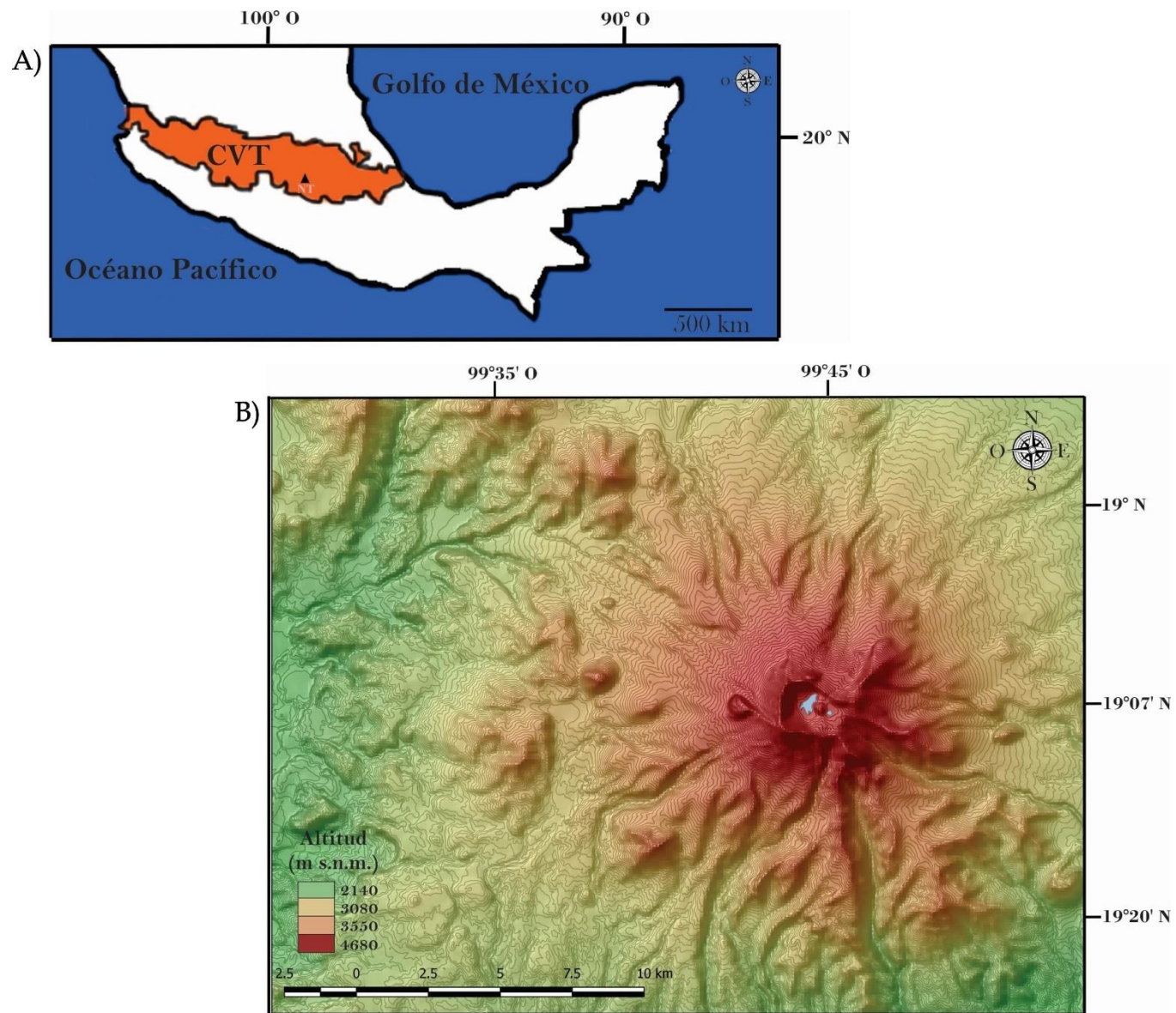


Figura 5. Mapas del área de estudio. A) Ubicación del Volcán Nevado de Toluca (NT) en el Cinturón Volcánico Transmexicana (CVTM (Elaborado en el software de Mapa Digital, INEGI) B) Mapa altimétrico del Volcán Nevado de Toluca (Elaborado en el software QGIS 2.18)



#### **7.4 Limnología de los Lagos “El Sol” y “La Luna”**

Los lagos “El Sol” y “La Luna” son cuerpos de agua de alta montaña o alpinos, dado que se localizan aproximadamente 200 m por encima de la línea de crecimiento arbóreo, ubicado aproximadamente a los 4,000 m.s.n.m. (Alcocer, 2017; Merino-Ibarra *et al.*, 2015; Banderas-Tarabay *et al.*, 1991). Son lagos astáticos perennes, lo que significa que sus niveles de agua se elevan y decrecen como resultado del balance de precipitación- evaporación, pero sin secarse. Además, son lagos polimícticos cálidos, ya que su columna de agua no presenta una estratificación térmica estable y sus aguas no se congelan durante el invierno (Alcocer *et al.*, 2004; Dimas-Flores *et al.*, 2008; Alcocer, 2017).

Ambos lagos se encuentran geográficamente muy cercanos, pero tienen características morfométricas y fisicoquímicas distintas. La composición química de las aguas de los lagos está asociada al tipo de rocas volcánicas que forman su cuenca (andesitas y dacitas), aunado a la inactividad (influencia magmática reducida o nula) del volcán (Alcocer, 2017). Sin embargo, es relevante destacar las principales características de cada lago, las cuales se resumen en la Tabla 1, basada en la literatura publicada por Delgado-Oceja, 2004; Banderas-Tarabay *et al.*, 1991; Alcocer *et al.*, 2004; Alcocer, 2017; Caballero, 1996; Cuna *et al.*, 2014; y Cuna, 2015.

Tabla 1. Características principales morfométricas, físicas, químicas y tróficas de los lagos "El Sol" y "La Luna".

Parámetro/Lago	"La Luna"	"El Sol"
Superficie (m <sup>2</sup> )	31,100 (227 m longitud, 209 de ancho)	237,321 (795 m longitud y 482 m ancho)
Profundidad máxima (m)	10	15
Profundidad media (m)	5	6
Temperatura media anual del agua (°C)	8.5	8.5
pH medio del agua	4.7 a 6.2	5.5 a 7.2
Alcalinidad total (mg/ 1 CaCO <sub>3</sub> )	5	5
Conductividad eléctrica (µS/cm)	9.5 a 14	16 a 59
Aniones	[HCO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ] >> [Cl <sup>-</sup> ] - [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	[HCO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ] >> [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] - [Cl <sup>-</sup> ]
Cationes	[Ca <sup>2+</sup> ] > [Mg <sup>2+</sup> ] >> [Na <sup>+</sup> ]	[Ca <sup>2+</sup> ] > [Na <sup>+</sup> ] >> [Mg <sup>2+</sup> ]
Clorofila "a" (µg/L)	0.13 a 0.89	0.14 a 1.62
Estado trófico	Ultra oligotrófico	Oligotrófico

## **8. METODOLOGÍA**

### **8.1 Trabajo de campo**

En el 2013, con ayuda de un nucleador de gravedad marca UWITEC, en el lago “El Sol”, se recuperaron dos núcleos cortos paralelos de sedimento de 60 cm, denominados SOL13-IG y SOL13-IIG. En el lago “La Luna” se recuperaron dos núcleos cortos paralelos de sedimento de 48 cm denominados LUNA13-IG y LUNA13-IIG.

### **8.2 Trabajo de laboratorio**

Los núcleos SOL13-IIG y LUNA13-IIG fueron extraídos mediante un embolo y seccionados cada centímetro. Las muestras fueron enviadas al laboratorio de Radiocronología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, sede Mazatlán, con el objetivo de establecer un modelo de edad con base en el método del  $^{210}\text{Pb}$ . De esta forma se determinó una tasa de sedimentación promedio para cada lago, la cual se utilizó para estimar la edad de las muestras de los primeros 10 cm de los núcleos SOL13-IG y LUNA13-IG.

Los núcleos SOL13-IG y LUNA13-IG fueron abiertos longitudinalmente en dos mitades. Fueron fotografiados y descritos en el laboratorio de Paleolimnología en el Instituto de Geofísica, UNAM. Estas secuencias fueron muestreadas cada centímetro y las muestras fueron divididas en submuestras de distintos volúmenes, para realizar estudios de diatomeas ( $1\text{ cm}^3$ ), amebas testadas y quironómidos ( $2\text{ cm}^3$ ). Se analizaron los primeros 10 cm de ambas secuencias para diatomeas y en el caso de la secuencia del lago “La Luna”, también se analizaron los primeros 10 cm para amebas testadas y quironómidos.

### **8.3 Análisis de diatomeas**

Fueron realizados en el laboratorio de Paleolimnología del Instituto de Geofísica de la UNAM. Para el análisis de diatomeas, el sedimento fue congelado, liofilizado y pesado para proceder con la limpieza de las valvas de diatomeas. Para el lago de

“La Luna” se pesaron 0.5 g y para el lago “El Sol” se pesaron 0.2 g de sedimento. Las muestras se trataron con 10 ml de ácido clorhídrico diluido (HCl 10%) para la eliminación de carbonatos, mientras que, para la eliminación de materia orgánica y para dispersar el sedimento, se vertieron 30 ml de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30%) con 10% de pirofosfato de sodio (Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>). Finalmente, se agregaron 5 ml de ácido nítrico (H<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>) y se continuó agregando H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> hasta la eliminación total de la materia orgánica. Posteriormente, las muestras fueron enjuagadas mediante decantaciones sucesivas de 24 horas con una línea al vacío, hasta la eliminación de las sustancias empleadas anteriormente. Después de los enjuagues, las muestras se trasvasaron a botellas de plástico de 30 ml.

Las muestras se montaron en preparaciones permanentes, realizando diluciones en proporciones de 1:5, 1:10, 1:20 y 1:50, las cuales fueron determinadas según la mejor dispersión de las diatomeas. Las preparaciones permanentes se montaron utilizando 200 µl de la dilución correspondiente y utilizando resina Naphrax®. Las laminillas permanentes fueron observadas en un microscopio fotónico compuesto OLYMPUS BX50 con 1000x, para llevar a cabo los conteos de valvas mediante transectos, y la cuantificación total mínima fue de 300 valvas por cada laminilla. Para la identificación de los taxones de diatomeas, se tomaron microfotografías bajo el microscopio fotónico compuesto (OLYMPUS BX50) y también micrografías en un microscopio electrónico de barrido JEOL (JEM-6000-PLUS, Laboratorio de Paleoecología, Paleoclimatología y Cambio Climático, en el Instituto de Geología, UNAM).

Para la identificación taxonómica de diatomeas se empleó se consultó la siguiente literatura especializada: Krammer y Lange-Bertalot, 1986, 1988, 1997a y b, Krammer y Fott, 1983, y Caballero 1996; y se revisaron las páginas de internet AlgaBase y Diatoms of North America.

#### 8.4 Análisis de amebas testadas y quironómidos

Se examinaron 2 cm<sup>3</sup> de sedimento en volumen húmedo de las profundidades 2, 4, 6, 8 y 10 cm del núcleo Luna13-IG, los cuales se tamizaron en una malla de 56 µm. La fracción menor del sedimento tamizado se conservó en frascos con etanol al 95%, pero no fue revisada al microscopio estereoscópico. La fracción mayor a 56 µm, fue revisada por completo mediante alícuotas en una caja Petri, bajo un microscopio estereoscópico OLYMPUS SZX12.

Las testas halladas en las muestras se extrajeron con un pincel fino y se colocaron en portaobjetos con una gota de glicerina. Para la identificación taxonómica se realizó un registro fotográfico y algunos ejemplares se observaron en microscopía electrónica de barrido (JEOL JEM-6000-PLUS, laboratorio de Paleoecología, Paleoclimatología y Cambio Climático, en el Instituto de Geología, UNAM). La identificación taxonómica se realizó con literatura especializada, tomando en cuenta las publicaciones realizadas por Ogden y Hedley, 1980, Kumar y Dalby, 1998, Patterson *et al.*, 2013, Roe y Patterson 2014, Nasser *et al.*, 2016, Prentice *et al.*, 2018, Steele *et al.*, 2018.

Es importante aclarar, que las especies lacustres de amebas testadas pueden presentar una gran diversidad morfológica controlada de forma ecofenotípica, por lo que a estos *taxa* se les ha designado como “variedades” (Patterson *et al.*, 2012a; Medioli y Scott, 1988). Esta designación infraespecífica no se encuentra bajo el Código Internacional de Nomenclatura Zoológica. Sin embargo, son útiles para delinear poblaciones ambientalmente significativas dentro de entornos lacustres (Patterson y Kumar, 2002a; Patterson *et al.*, 2012b).

Las cápsulas cefálicas de quironómidos halladas en la fracción mayor a 53 µm, se seleccionaron con pinzas finas y se enjuagaron con KOH al 8% y se lavaron con agua. Posteriormente, se montaron ventralmente en portaobjetos con Hydromatrix®. Las cápsulas cefálicas se observaron en el microscopio fotónico compuesto OLYMPUS BX50 a 100, 200 y 400x para su determinación taxonómica.

Ésta se apoyó también de un registro fotográfico de cada cápsula cefálica. La literatura que se empleó para la identificación taxonómica fue Epler, 2001 e Ilyashuk *et al.*, 2010.

## 8.5 Análisis numéricos

Abundancia y concentración de bioindicadores: De los conteos realizados para la cuantificación de especies de diatomeas, se realizó la transformación de los datos obtenidos en abundancias relativas, y se calculó la abundancia total de las valvas por gramo de sedimento seco (v/gss) de cada muestra, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Ab_{tot} = (C A V_t) / (a V_p x)$$

Donde:

$Ab_{tot}$ : Abundancia total de valvas por gramo de sedimento seco ( $\times 10^6$ )

C: Número de valvas promedio por transecto diametral

A: Área del cubreobjetos

a: área del transecto diametral

$V_t$ : Volumen de dilución de la muestra total

$V_p$ : Volumen de la alícuota utilizada para montar la laminilla

x: gramos iniciales de sedimento seco procesados

Para el lago “La Luna”, se estimó la concentración (v/gss) de cada especie. Las gráficas de los datos de diatomeas se realizaron mediante el programa *Tilia*, para el caso del lago “El Sol” las gráficas de las especies de diatomeas se presentan como porcentajes, mientras que para el lago “La Luna” se utilizaron las concentraciones de cada especie. Los taxones identificados de amebas testadas y quironómidos se expresaron como el número de testas o cápsulas cefálicas identificados en los 2 cm<sup>3</sup> de muestra analizados, y se graficaron empleando el programa *Tilia* (Grimm, 1992).

Medidas de diversidad de bioindicadores: Para los tres grupos de bioindicadores y para cada lago, mediante el uso del programa *Past* (Hammer et al. 2001), se determinó la riqueza específica (S), diversidad de Shannon-Wiener (H'), y la

Diversidad verdadera ( ${}^2D$ ). El cálculo de índices de diversidad en estudios paleolimnológicos nos permite evaluar las condiciones ambientales, ya que éstas influyen directamente en la estructura de una comunidad biológica, por lo que es útil para evaluar la salud relativa de la comunidad (Patterson *et al.*, 2002).

El índice de diversidad de Shannon-Wiener ( $H'$ ) es utilizado para examinar la diversidad comunitaria de las especies encontradas en cada muestra, además el cálculo de este índice permite evaluar la salud del ecosistema (Moreno, 2001; Patterson *et al.*, 2012b; Nasser *et al.*, 2019). En el caso específico, de amebas testadas en estudios paleolimnológicos Patterson y Kumar, 2002 establecieron valores de  $H'$  que permiten reconocer la salud de los lagos, en donde las condiciones estables están representadas por valores arriba de 2.5, condiciones de transición ecológica con valores de 2.5–1.5 y condiciones ambientales desfavorables con valores por debajo de 1.5.

La ecuación para el cálculo del índice de Shannon-Wiener es:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \times \ln(P_i)$$

Donde

$H'$  = índice de Shannon-Wiener en unidades Nats/individuo

$P_i$  = Proporción de la especie  $i$  respecto al total de individuos de la muestra ( $\frac{n_i}{N}$ )

$S$  = Riqueza de especies en la muestra.

$N$  = Número total de individuos.

El índice de Diversidad verdadera ( ${}^2D$ ), representa el número equivalente de especies igualmente distribuidas en una comunidad (Jost, 2006; Jost *et al.*, 2012). Es decir, mide la diversidad que tendría una comunidad integrada por  $i$  especies igualmente comunes, lo cual permite comparar la magnitud de la diferencia en la diversidad de dos o más comunidades (Moreno *et al.*, 2011). Este índice se



calcula a partir del índice Shannon-Wiener (Jost, 2006; Jost *et al.*, 2012) de acuerdo con la siguiente expresión matemática, descrita por Jost 2006:

$${}^2D = \exp(H')$$

Donde:

${}^2D$  = Diversidad Verdadera

$\exp(H')$  = Exponente del índice de Diversidad de Shannon-Wiener

Análisis de agrupamiento: Para la mejor comprensión de los datos obtenidos de las amebas testadas del lago “La Luna”, se realizó un análisis de grupos modo Q y modo R. En el análisis no se incluyó al grupo de las diatomeas, ya que, no se analizaron los mismos centímetros de manera continua en ambos grupos.

El análisis de modo Q, determina y agrupa muestras con distribuciones de especies similares (Patterson y Kumar, 2000), de este modo, cada grupo representa muestras de un único entorno o biofacie (Fishbein y Patterson, 1993). El análisis modo R, determina las relaciones entre especies a través de todas las muestras, es decir, agrupa especies que se asocian estrechamente con otras (Patterson *et al.*, 1996; Boudreau *et al.*, 2005; Roe y Patterson, 2014).

Posteriormente, se realizó un mapa de calor con un análisis de grupos de dos vías, empleando las paqueterías Vegan, mixOmics, y Graphics en la plataforma R-Project (Oksanen, 2015; Nasser *et al.*, 2019). Los resultados de este análisis se reportan bajo distancias euclidianas.

## 9 RESULTADOS

### 9.1 Marco cronológico

La cronología de las secuencias se estableció mediante el análisis de  $^{210}\text{Pb}$ . Los datos obtenidos indican que el nivel base de  $^{210}\text{Pb}$  se alcanzó a los 20 cm, en el caso del núcleo LUNA13-IIG y a los 11 cm para el núcleo SOL13-IIG (Alcocer *et al.* 2020). En ambos casos se aplicó el modelo CFCS (por sus siglas en inglés, *Constant Flux/Constant Sedimentation*), en el que se asume que existe un flujo constante de  $^{210}\text{Pb}$  atmosférico y una tasa de sedimentación constante (Sánchez-Cabeza y Ruíz-Fernández, 2012; Alcocer *et al.* 2020).

Los resultados obtenidos en el análisis de  $^{210}\text{Pb}$  (Alcocer *et al.* 2020), permitieron estimar una tasa de sedimentación de 0.18 cm/año para los primeros 20 cm del núcleo LUNA13-IIG, lo que permitió establecer un intervalo cronológico para los primeros 10 cm de esta secuencia, entre 1959 a 2013 (Figura 6 A). Mientras que, para el núcleo SOL13-IIG se estimó una tasa de sedimentación de 0.17 cm/año para los primeros 11 cm, estimando un intervalo cronológico para los primeros 10 cm de esta secuencia, entre 1938 a 2013 (Figura 6 B).

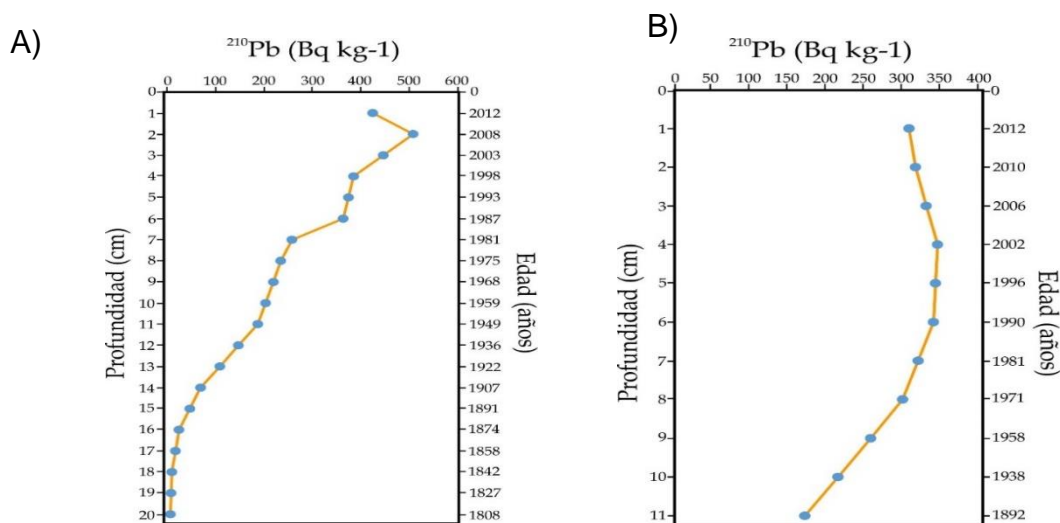


Figura 6. Gráficas de actividad total de  $^{210}\text{Pb}$  y estimación cronológica calculada. Figura A) lago "La Luna" B) lago "El Sol".

## 9.2 Registro paleolimnológico de los lagos "El Sol" y "La Luna"

A continuación, se presentan los resultados taxonómicos obtenidos del trabajo realizado en los núcleos de sedimento LUNA13-IG y SOL13-IG, en los que se incluyen los análisis de diatomeas, amebas testadas y quironómidos, y los análisis ecológicos que se realizaron para la interpretación de estos resultados.

### 9.2.1 Diatomeas

En el lago "El Sol", se identificaron 30 especies de diatomeas distribuidas en 18 géneros, las cuales se muestran en el listado taxonómico de la Tabla 2, de acuerdo con la clasificación realizada por Medlin y Kaczmarek, 2004 y la publicación de Caballero, 1996, ya que describe las características principales de las diatomeas *Navicula* NTA y *N. NTB* (*taxa* posiblemente endémicas de estos lagos).

Tabla 2. Lista taxonómica de los taxones registradas en los lagos “El Sol” y la “La Luna”. Se utilizó la clasificación publicada por Medlin y Kaczmarska, 2004 y de Caballero, 1996.

---

- Phylum Bacillariophyta Karsten, 1928
  - Subphylum Coscinodiscophytina Medlin & Kaczmarska, 2004
    - Clase Coscinodiscophyceae R.M.Crawford & D.G.Mann, 1990
      - Orden Aulacoseirales Crawford, 1990
        - Familia Aulacoseiraceae Crawford
          - Género *Aulacoseira*
            - ★ *Aulacoseira nivaloides* (K.E.Camburn) J.English & M.Potapova 2009
  - Subphylum Bacillariophytina Medlin & Kaczmarska, 2004
    - Clase Bacillariophyceae Haeckel, 1878
      - Subclase Eunotiophycidae D.G.Mann, 1990
        - Orden Eunotiales P.C.Silva, 1962
          - Familia Eunotiaceae Kützing, 1844
            - Género *Eunotia* Ehrenberg, 1837
              - *Eunotia* sp.
    - Subphylum Bacillariophytina Medlin & Kaczmarska, 2004
      - Clase Mediophyceae Medlin & Kaczmarska, 2004
        - Subclase Thalassiosirophycidae Round & R.M.Crawford, 1990
          - Orden Stephanodiscales Nikolaev & Harwood
            - Familia Stephanodiscaceae I.V.Makarova in Z.I.Glezer & I.V.Makarova, 1986
              - Género *Discotella* V.Houk & R.Klee, 2004
                - ▲ *Discotella stelligera* (Cleve & Grunow) Houk & Klee 2004
        - Clase Bacillariophyceae Haeckel, 1878
          - Subclase Fragilariophycidae Round, 1990
            - Orden Fragilariales P.C.Silva, 1962
              - Familia Staurosiraceae Medlin, 2016
                - Género *Staurosira* Ehrenberg, 1843
                  - ▲ *Staurosira construens* var. *venter* (Ehrenberg) P.B.Hamilton, 1992
                - Género *Staurosirella* D.M.Williams & Round, 1988
                  - ▲ *Staurosirella pinnata* (Ehrenberg) D.M.Williams & Round 1988
                  - ▲ *Staurosirella* sp.
          - Subclase Bacillariophycidae D.G.Mann, 1990
            - Orden Bacillariales Hendey, 1937
              - Familia Bacillariaceae Ehrenberg, 1831
                - Género *Nitzschia* Hassall, 1845
                  - ▲ *Nitzschia palea* (Kützing) W.Smith, 1856
            - Orden Cocconeidales E.J.Cox, 2015
              - Familia Achnanthidiaceae D.G.Mann, 1990
                - Género *Planothidium* Round & L.Bukhtiyarova, 1996

- ▲ *Planothidium lanceolatum* (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot, 1999
- Género *Psammothidium* L.Buhtkiyarova & Round, 1996
- ★ *Psammothidium helveticum* (Hustedt) Bukhtiyarova & Round 1996
- ★ *Psammothidium levanderi* (Hustedt) Bukhtiyarova & Round 1996
- Orden Cymbellales D.G.Mann
  - Familia Cymbellaceae Kützing, 1844
  - Género *Cymbella* C.Agardh, 1830
  - ★ *Cymbella cymbiformis* C.Agardh, 1830
  - Familia Gomphonemataceae Kützing, 1844
  - Género *Encyonema* Kützing, 1834
  - ★ *Encyonema perpusillum* (Cleve-Euler) D.G.Mann, 1990
  - Género *Gomphonema* Ehrenberg, 1832
  - ▲ *Gomphonema gracile* Ehrenberg 1838
- Orden Naviculales Bessey, 1907
  - Familia Pinnulariaceae D.G.Mann, 1990
  - Género *Pinnularia* Ehrenberg, 1843
  - ★ *Pinnularia* aff. *vidiris*
  - ★ *Pinnularia borealis* Ehrenberg, 1843
  - ★ *Pinnularia microstauron* (Ehrenberg) Cleve, 1891
  - Suborden Neidiineae D.G.Mann,
    - Familia Amphipleuraceae Grunow, 1862
    - Género *Frustulia* Rabenhorst, 1853
    - ★ *Frustulia rhomboides* (Ehrenberg) De Toni 1891
  - Familia Cavinulaceae D.G.Mann.
    - Género *Cavinula* D. G. Mann & A.J. Stickle, 1990
    - ★ *Cavinula pseudoscutiformis* (Hustedt) D.G.Mann & A.J.Stickle
  - Familia Diadesmidaceae D.G.Mann
    - Género *Luticola* D.G.Mann, 1990
    - *Luticola mutica* (Kützing) D.G.Mann, 1990
  - Familia Stauroneidaceae D.G.Mann
    - Género *Stauroneis* Ehrenberg, 1843
    - ▲ *Stauroneis* sp.
- Suborden Naviculineae Hendey
  - Familia Naviculaceae Kützing, 1844
  - Género *Caloneis* Cleve, 1894
  - ★ *Caloneis aerophila* W.Bock, 1963
  - Género *Navicula* Bory, 1822
  - ★ *Navicula cryptotenella* Lange-Bertalot, 1985
  - *Navicula* NTA
- Suborden Sellaphorineae
  - Familia Sellaphoraceae Sellaphoraceae Mereschkowsky, 1902
  - Género *Sellaphora* Sellaphoraceae Mereschkowsky, 1902

★ *Navicula* NTB  
Orden Surirellales D.G.Mann, 1990  
Familia Surirellaceae Kützing, 1844  
Género *Stenopterobia* Brébisson ex Van Heurck, 1896  
★ *Stenopterobia delicatissima* (F.W.Lewis) Brébisson ex Van  
Heurck 1896  
Género *Surirella* Turpin, 1828  
★ *Surirella linearis* W.Smith, 1853  
▲ *Surirella* sp.

- 
- ★ Especies presentes en ambos lagos.
  - ▲ Especies presentes en el lago “El Sol”.
  - Especies presentes en el lago “La Luna”.

La abundancia total de las diatomeas fluctuó entre 395 a  $9,206 \times 10^6$  v/gss, de las cuales, *Aulacoseria nivaloides*, *Navicula* NTB, *Cavinula pseudoscutifomis*, *Psammothidium levanderi* y *Encyonema perpusillum*, fueron las más abundantes (Figura 7). Cabe destacar la presencia de *Discostella stelligera* y *Nitzschia palea*, ambas especies se encuentran en porcentajes muy bajos ( $\leq 1.6\%$ ) en la secuencia sedimentaria revisada. *Discostella stelligera* tiene mayores porcentajes ( $> 0.5\%$ ) en las muestras 5 a 2 cm. Mientras que *Nitzschia palea* tiene sus valores más elevados en las muestras de 10 y 7 cm. Por otro lado, también se identificaron 3 especies pertenecientes a la familia Staurosiraceae, (*Staurosira construens* var. *venter*, *Staurosirella pinnata* y *Staurosirella* sp.), las cuales se agruparon en un ensamble denominado Staurosiraceae (Figura 7). Este ensamble tiene una abundancia relativa más o menos constante y en porcentajes bajos ( $\leq 5\%$ ), con sus valores más altos en la muestra de 3 cm.

En el lago “La Luna” se identificaron 18 especies distribuidas en 11 géneros, los cuales se muestran en el listado taxonómico de la Tabla 2, de acuerdo con la clasificación de Medlin y Kaczmarska, 2004 y la publicación de Caballero, 1996. La concentración de diatomeas, por muestra, tuvo un rango de 70 a  $302 \times 10^6$  v/gss (Figura 8), dentro de las cuales, las especies *Encyonema perpusillum*, *Navicula* NTA

y *Psmmothidium helveticum*, presentaron una mayor concentración. Cabe destacar, que la muestra que corresponde al centímetro uno, presenta mayor riqueza de especies con una concentración total de diatomeas baja y *E. perpusillum* presenta una concentración menor (Figura 8). Las micrografías de microscopía electrónica de barrido y las fotografías en microscopio óptico compuesto de las especies de diatomeas registradas en el lago “La Luna” y “El Sol”, se muestran en las Figuras 9 y 10.

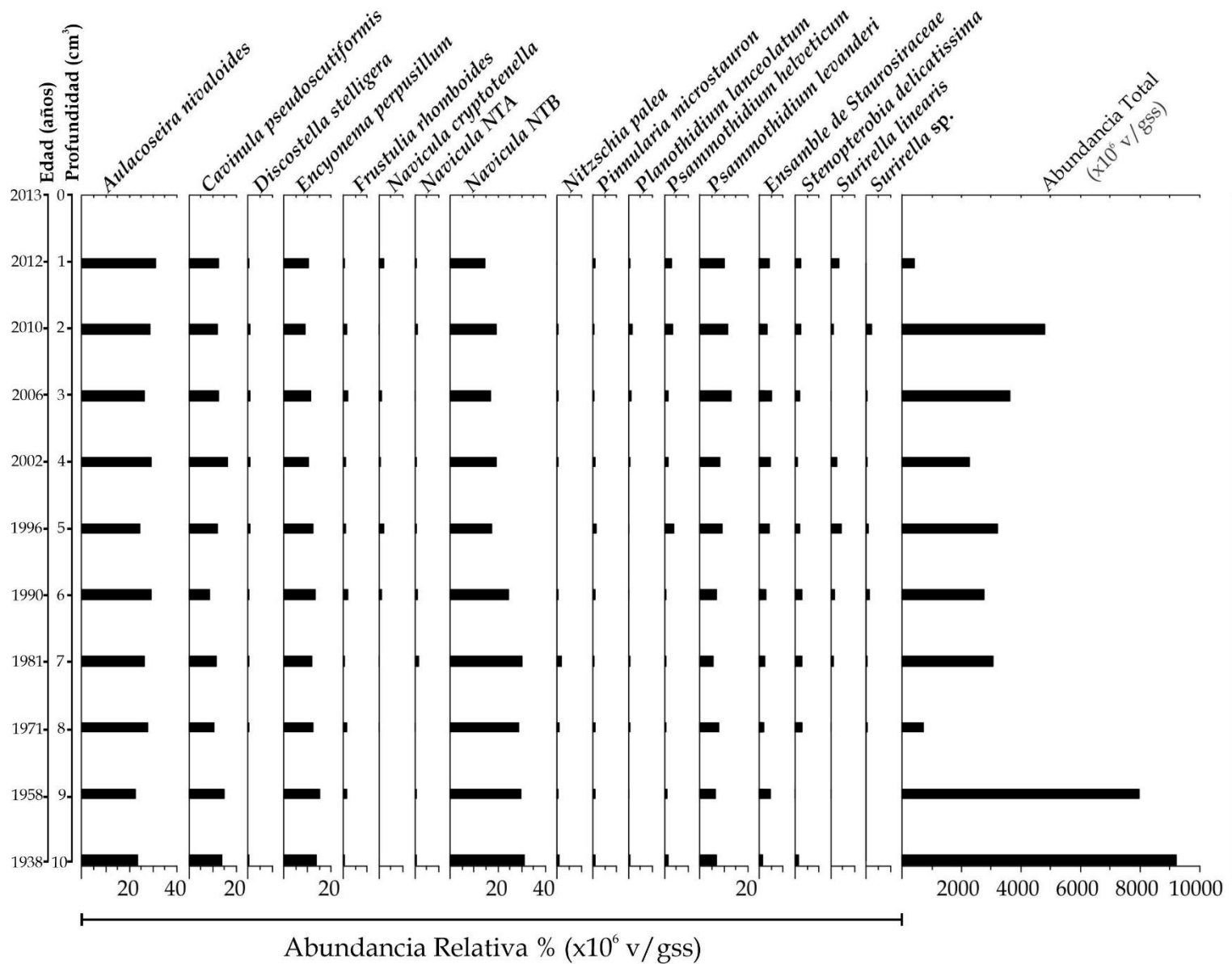


Figura 7. Abundancias relativas (%) de diatomeas en el lago "El Sol", en donde se muestra la profundidad (cm<sup>3</sup>) y la edad estimada con <sup>210</sup>Pb.



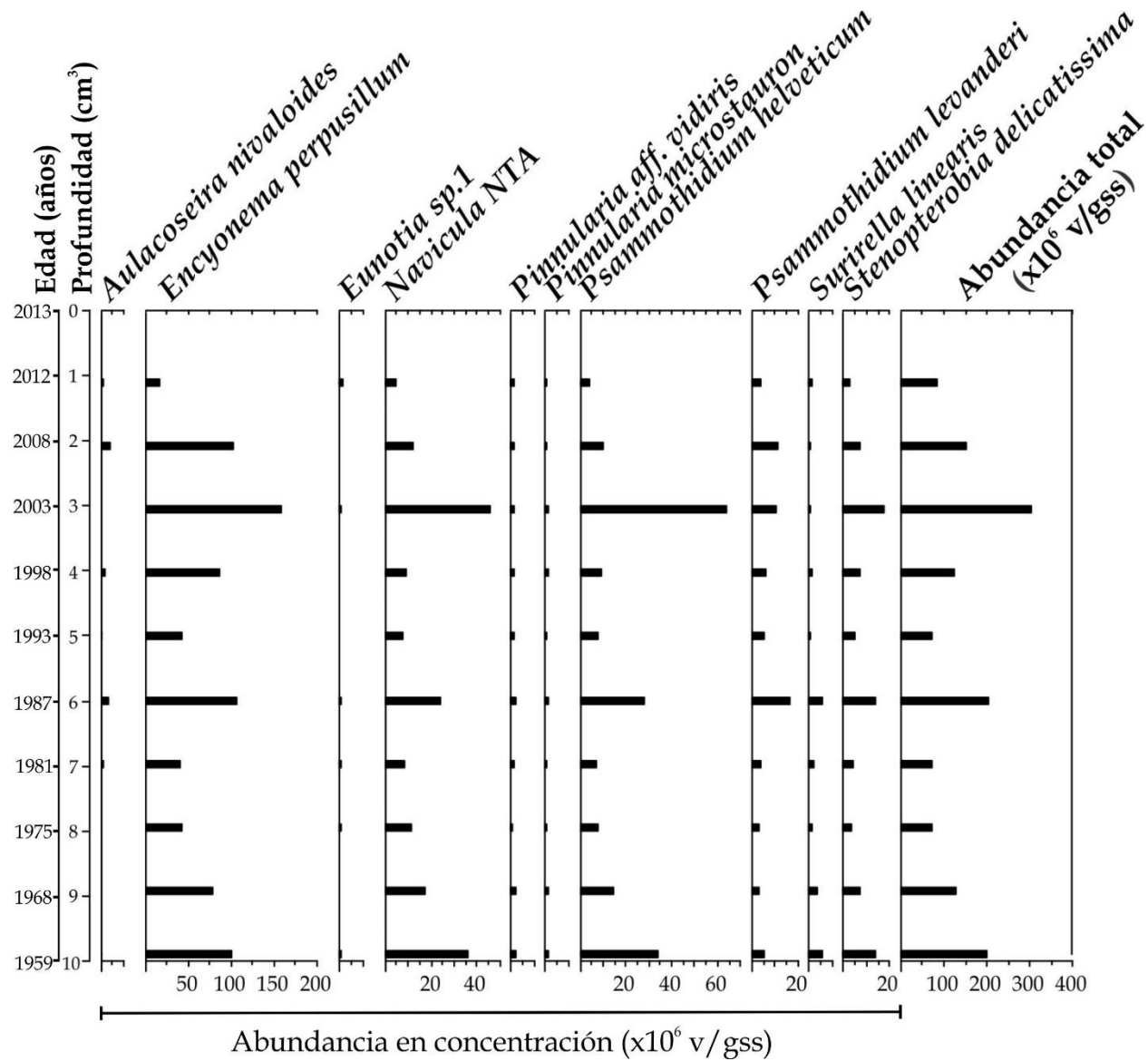


Figura 8. Abundancias en concentración de diatomeas en el lago "La Luna", en donde se muestra la profundidad (cm<sup>3</sup>) y la edad estimada con <sup>210</sup>Pb.

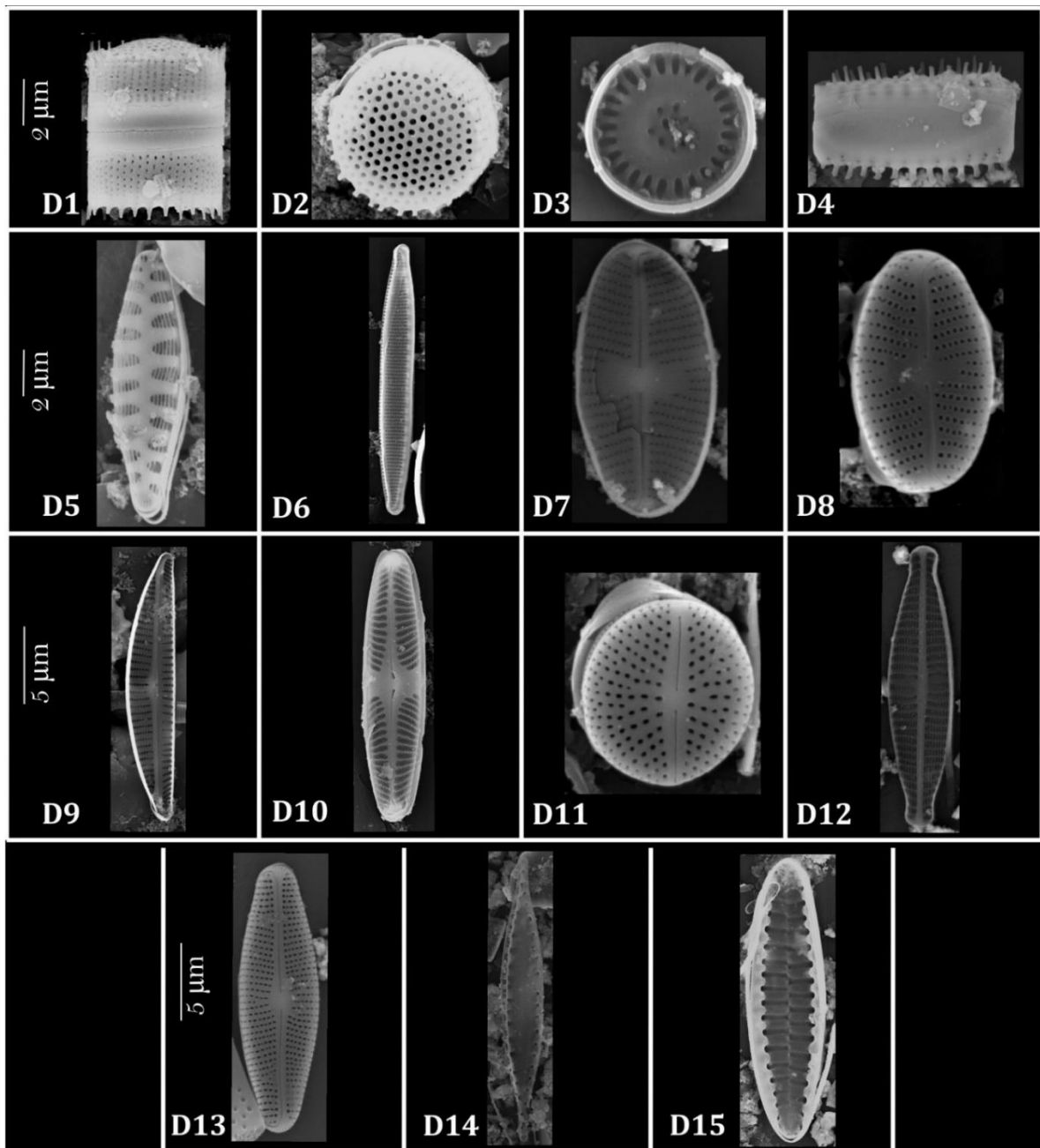


Figura 9. Micrografías de microscopía electrónica de barrido de los principales taxa de diatomeas halladas en los lagos “El Sol” y “La Luna”. (D1) *Aulacoseira nivaloides* vista cingular y (D2) vista valvar, (D3) *Discostella stelligera*, (D4) *Staurosira construens* var. *venter*, (D5) *Staurosirella pinnata*, (D6) *Nitzschia palea*, (D7) *Psammothidium helveticum*, (D8) *Psammothidium levanderi*, (D9) *Encyonema perpusillum*, (D10) *Pinnularia microstauron*, (D11) *Cavinula pseudoscutiformis*, (D12) *Navicula* NTA, (D13) *Navicula* NTB, (D14) *Stenopterobia delicatissima*, (D15) *Suriella linearis*.

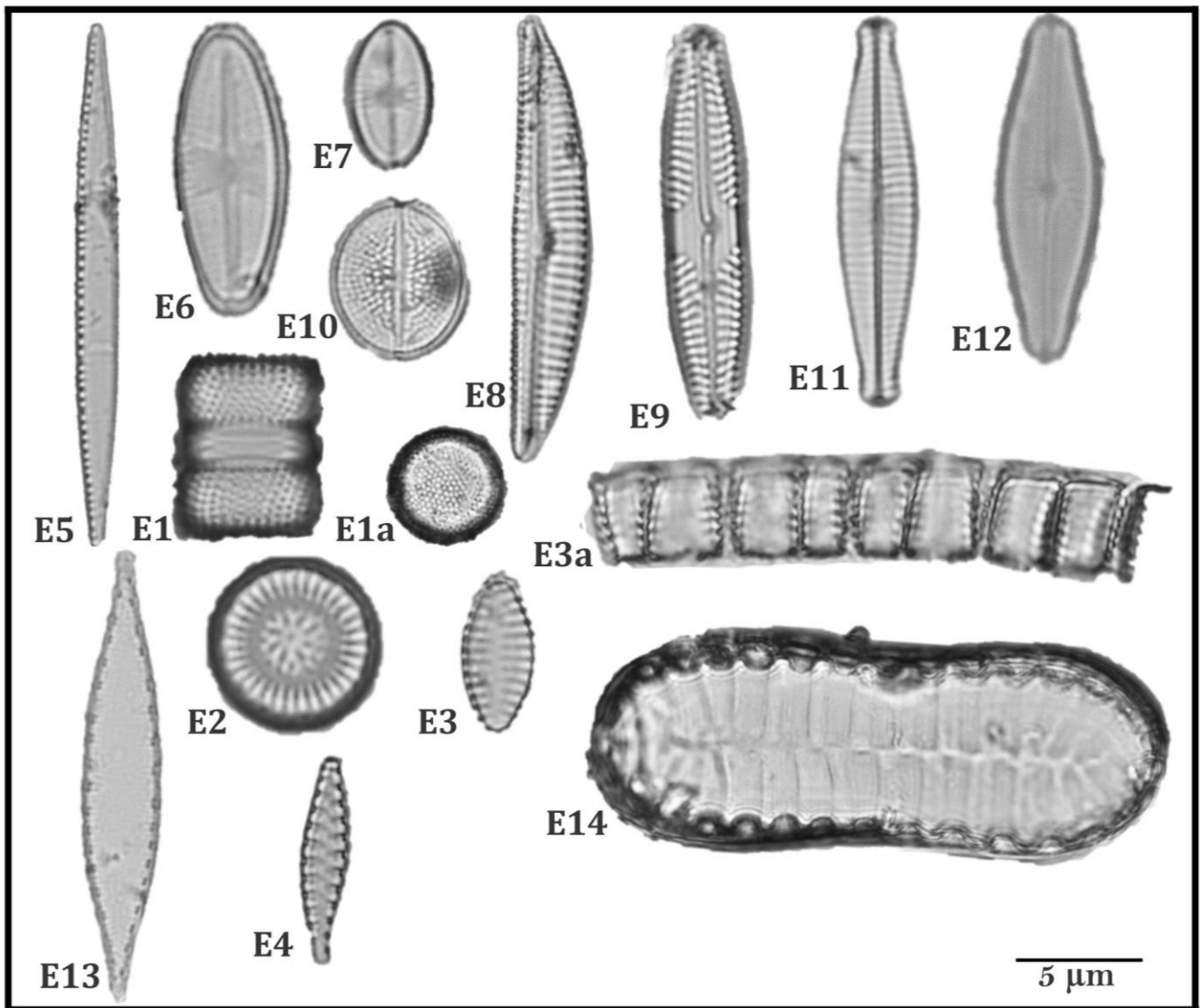


Figura 10. Microfotografías en microscopio óptico compuesto de los principales *taxa* de diatomeas halladas en los lagos “El Sol” y “La Luna”. (E1) *Aulacoseira nivaloides* vista cingular y (E1a) vista valvar, (E2) *Discostella stelligera*, (E3) *Staurosira construens* var. *venter* vista valvar y (E3a) vista cingular, (E4) *Staurosirella pinnata*, (E5) *Nitzschia palea*, (E6) *Psammothidium helveticum*, (E7) *Psammothidium levanderi*, (E8) *Encyonema perpusillum*, (E9) *Pinnularia microstauron*, (E10) *Cavinula pseudoscutiformis*, (E11) *Navicula* NTA, (E12) *Navicula* NTB, (E13) *Stenopterobia delicatissima*, (E14) *Surirella linearis*.

### 9.2.2 Amebas testadas

En el núcleo LUNA13-IG, se identificaron un total de 5 *taxa* pertenecientes a dos géneros, de las cuales a cuatro se les asignó una variedad, y se organizaron taxonómicamente (Tabla 3) de acuerdo con Adl *et al.*, 2012.

Las micrografías de microscopía electrónica de barrido y las fotografías en microscopio fotónico compuesto de los *taxa* de amebas testadas registradas en el lago “La Luna”, se muestran en las figuras 12 y 13. Dentro de las variedades identificadas, *Diffflugia glans* var. “glans” y *Diffflugia globulosa* se observaron con mayor concentración ( $> 100$  testas/ $2\text{cm}^3$ ) (Figura 12). Asimismo, *D. glans* var. “glans” se mantuvo presente y constante en toda la secuencia revisada. Por otro lado, *Diffflugia oblonga* var. “oblonga” aparece con una concentración menor ( $<17$  testas/ $2\text{cm}^3$ ) en toda la secuencia revisada, excepto en el 6 cm. *Centropyxis constricta* var. “aerophila”, *C. constricta* var. “spinosa”, y *D. globulosa* solo se registran en el 10, 8 y 6 cm. (Figura 11).

Tabla 3. Lista taxonómica de amebas testadas halladas en el lago “La Luna” acuerdo con Adl *et al.*, 2012.

---

Phylum Amoebozoa Lühe, 1913, emend. Cavalier-Smith 1998

- Clase Tubulinea Smirnov et al. 2005
    - Orden Arcellinida Kent 1880
      - Suborden Diffflugina Meisterfeld 2002
        - Familia Difflogiidae
          - Diffflugia globulosa* (Dujardin, 1837) Penard, 1902
          - Diffflugia glans* Penard, 1902 var. “glans”
          - Diffflugia oblonga* Ehrenberg, 1832 var. “oblonga”
          - Centropyxis constricta* Ehrenberg, 1843 var. “aerophila”
        - Familia Centropyxidae
          - Centropyxis constricta* Ehrenberg, 1843 var. “spinosa”
-

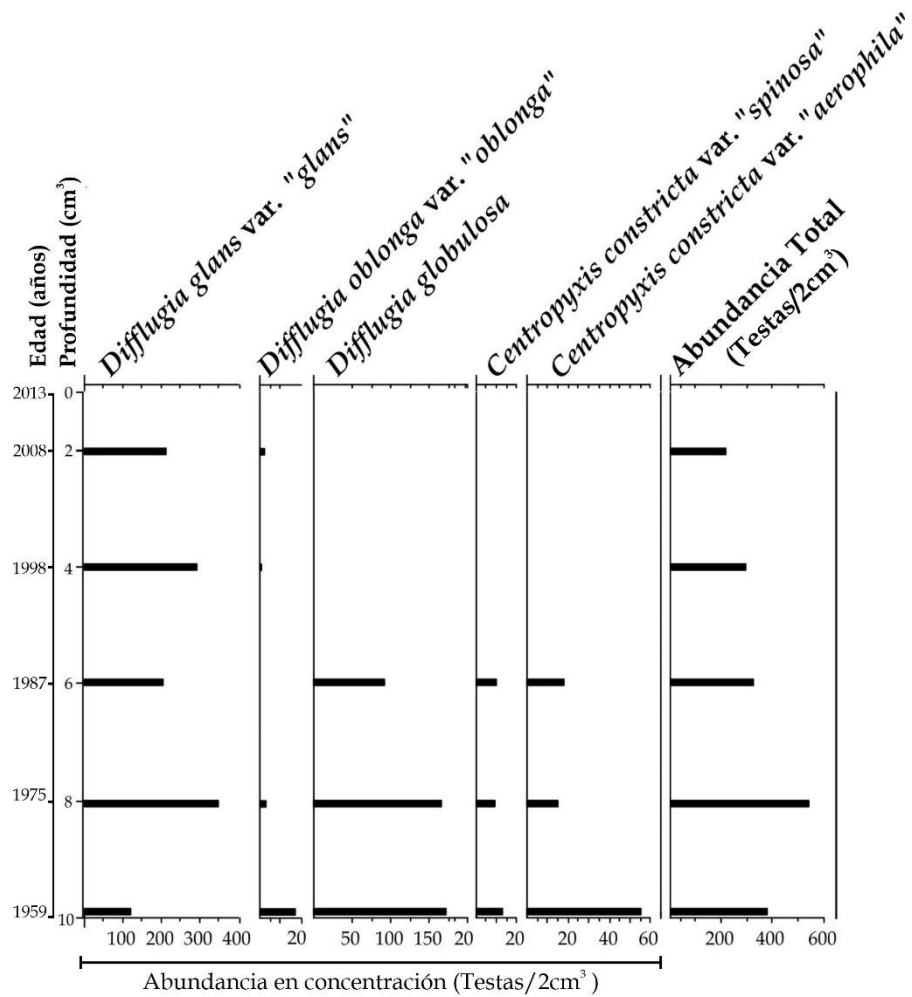


Figura 11. Abundancia de amebas testadas por 2 cm<sup>3</sup> de muestra analizados en el lago "La Luna", en donde se muestra la profundidad y la edad estimada con <sup>210</sup>Pb.

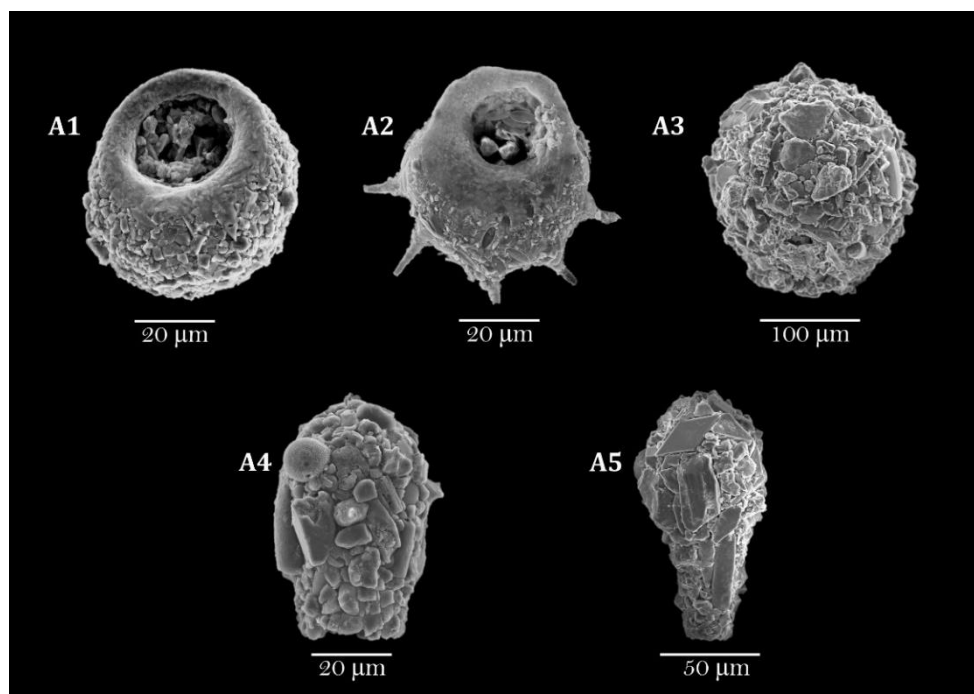


Figura 12. Micrografías de microscopía electrónica de barrido de los taxa de amebas testadas identificadas en el lago "La Luna". (A1) *Centropyxis constricta* var. "aerophila", (A2)

*Centropyxis constricta* var. "spinosa", (A3) *Diffflugia globulosa*, (A4) *Diffflugia glans* var. "glans" y (A5) *Diffflugia oblonga* var. "oblonga".

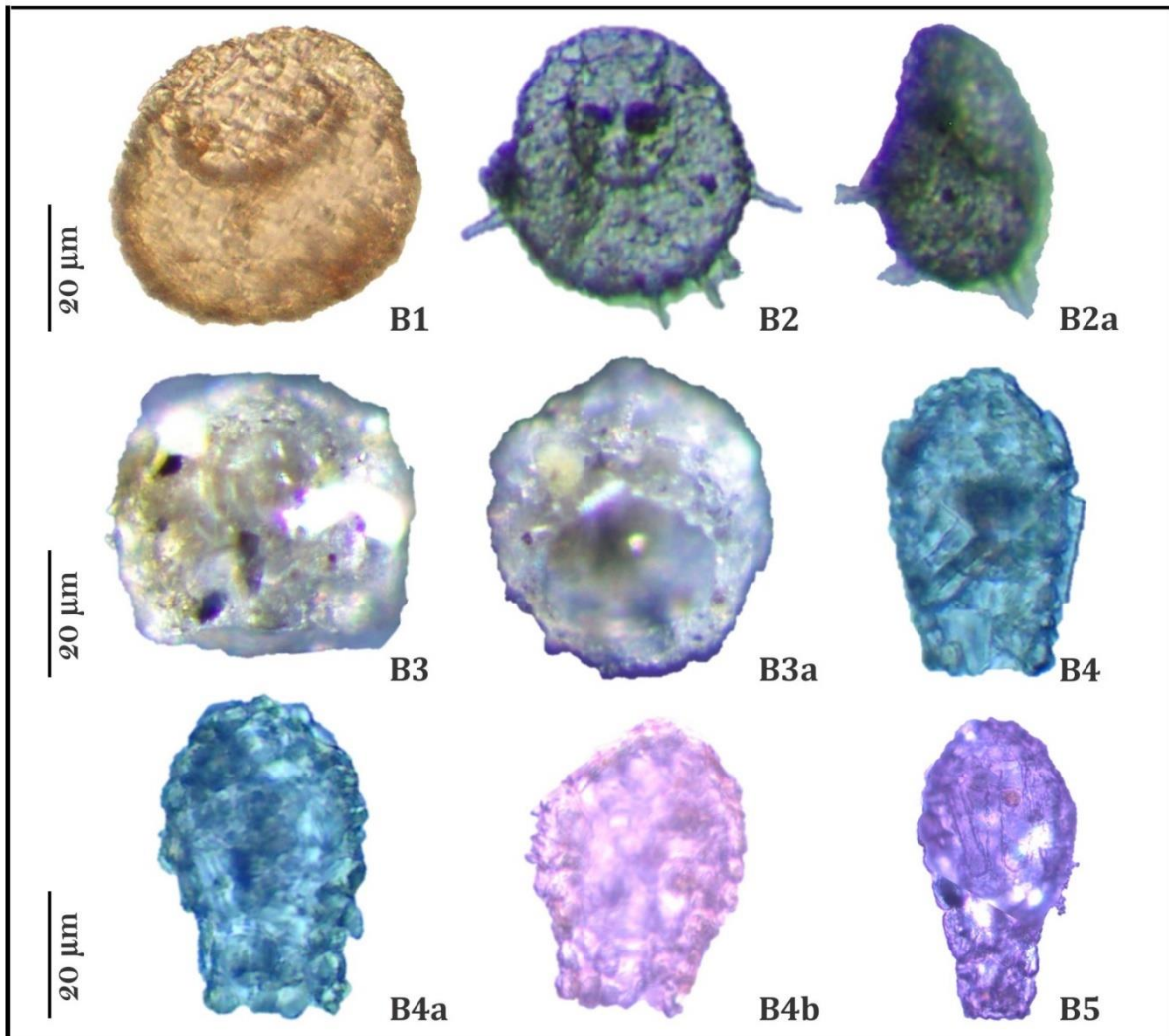


Figura 13. Fotografías en microscopio fotónico compuesto de los *taxa* de amebas testadas identificadas en el lago "La Luna". (B1) *Centropyxis constricta* var. "aerophila", (B2) *Centropyxis constricta* var. "spinosa" vista ventral y (B2a) vista lateral, (B3) *Diffflugia globulosa* vista lateral y (B3a) ventral, (B4-B4b) *Diffflugia glans* var. "glans" y (B5) *Diffflugia oblonga* var. "oblonga".

### 9.2.3 Quironómidos

En el núcleo LUNA13-IG, se identificó un taxon perteneciente a la subfamilia, Diamesinae y al género *Pseudodiamesa* (Tabla 4). La identificación a nivel de especie no fue posible, ya que para ello es necesario estudiar todas las fases del ciclo de vida, incluido el adulto, larva y pupa de estos organismos, y en este trabajo solo se revisaron las cápsulas cefálicas de las larvas conservadas en los sedimentos. Sin embargo, las características morfológicas de los ejemplares analizados permitieron ubicarlo taxonómicamente dentro del grupo *Pseudodiamesa branikii*.

La concentración de cápsulas cefálicas encontradas completas fue muy baja, de 1-9 individuos / 2 cm<sup>3</sup> de sedimento en las 5 muestras revisadas de la secuencia sedimentaria (Anexo 4). En la figura 14 se puede observar que, la mayor concentración de individuos se encuentra en los centímetros 10, 8 y 6, mientras que en los centímetros 4 y 2 presentan una menor concentración de individuos.

La morfología de las cápsulas registradas se muestra en la figura 15, además se muestran estructuras importantes para su diagnóstico dentro del grupo *P. branikii* (Moreno *et al.* 2020).

Tabla 4. Lista taxonómica del taxon encontrado en los sedimentos del lago “La Luna”. Se utilizó la nomenclatura publicada por Epler (2001) y Ilyashuk *et al.* (2010).

---

Subphylum Hexapoda  
Clase Insecta  
Orden Diptera  
Familia Chironomidae  
Subfamilia Diamesinae  
Género *Pseudodiamesa* Goetghebuer, 1939  
Grupo *Pseudodiamesa branickii*?

---

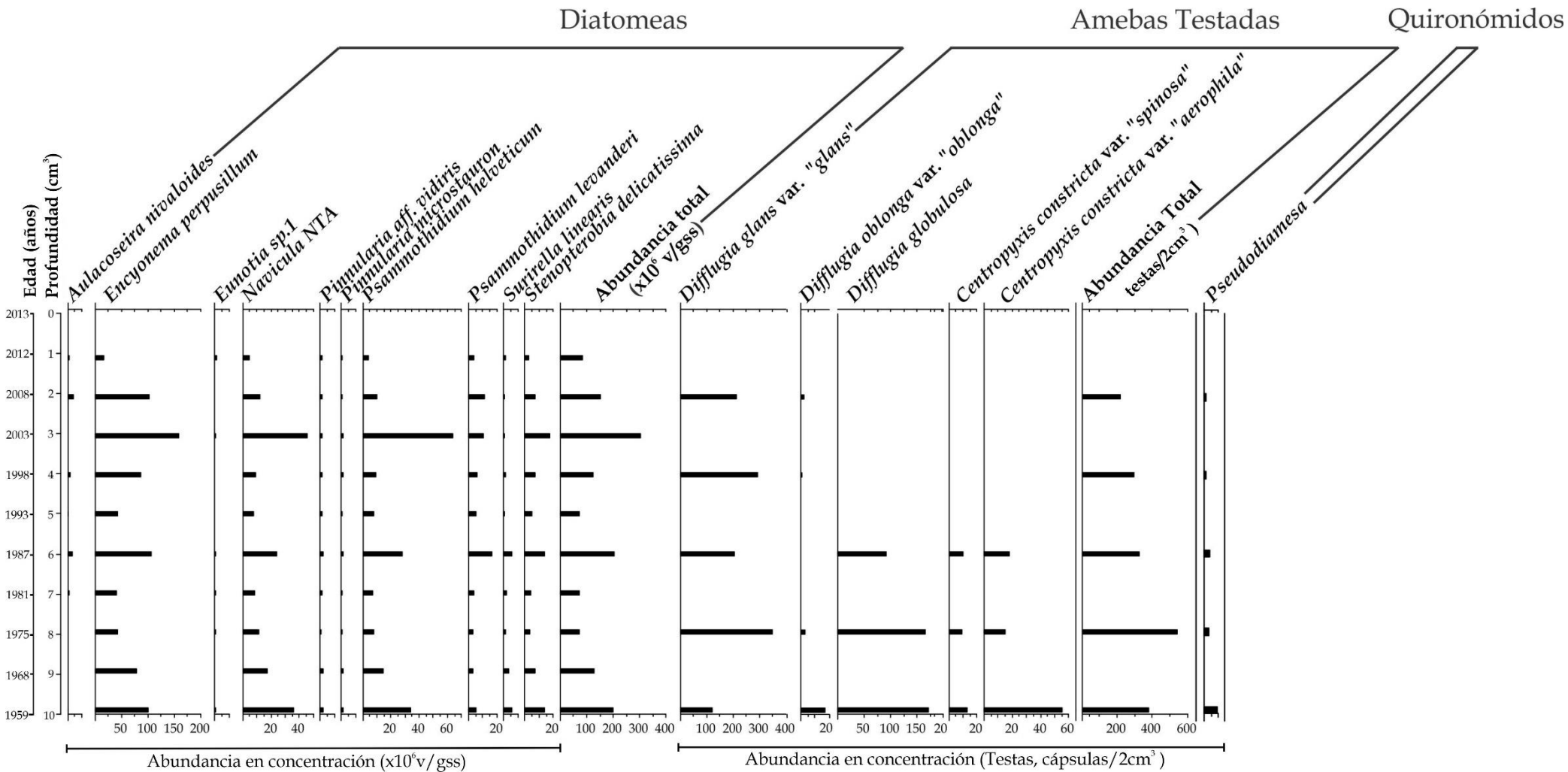


Figura 14. Grafica que muestra de la concentración de diatomeas, amebas testadas y quironómidos registrados en el lago "La Luna", con la profundidad (cm<sup>3</sup>) y la edad estimada con <sup>210</sup>Pb.



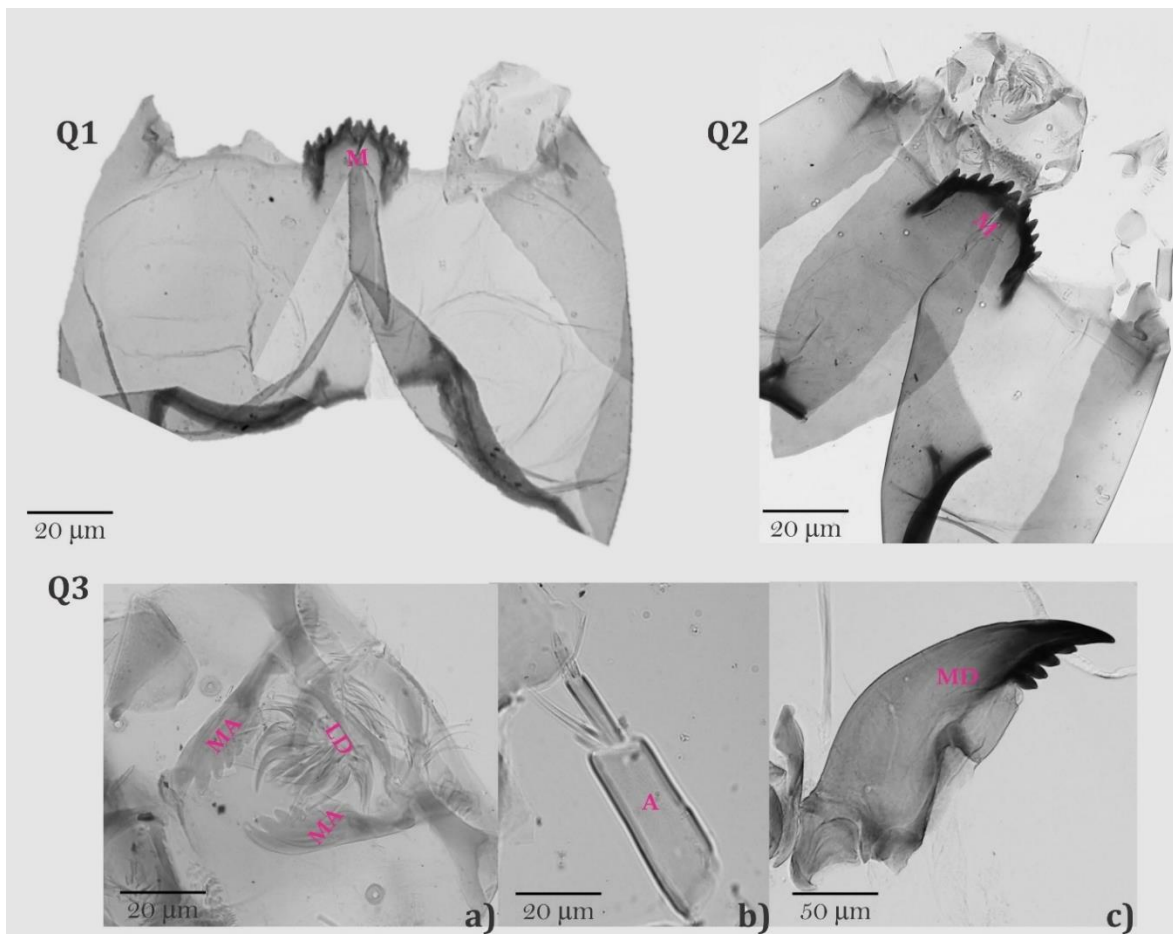


Figura 15. Fotografías en microscopio óptico compuesto de cápsulas cefálicas y algunas de sus estructuras principales. En las figuras Q1 y Q2, se muestran cápsulas cefálicas, en donde se destaca la morfología del mentum (M). En Q3 a): Pecten epipharyngis (LD) y Premandíbula (MA). b) Antena (A). c) Mandíbula (MD).

### 9.3 Análisis ecológicos

Los valores obtenidos del cálculo de la riqueza específica (S), índice de diversidad Shannon- Wiener (H') y diversidad verdadera ( $^2D$ ) de diatomeas y amebas testadas se muestran en la Tabla 5. Cabe destacar que estos cálculos no se realizaron para los quironómidos, ya que solo se identificó un taxón, y en muy baja abundancia.

En “La Luna”, la riqueza específica de diatomeas (S) fluctuó entre 9 y 15, mientras que la riqueza verdadera ( $^2D$ ) fluctuó entre 3.6 y 6.5 especies efectivas (Shannon- Wiener entre 1.1 y 1.9), con los valores más altos en la muestra del primer centímetro. En el lago “El Sol”, los valores de S son aproximadamente el doble que en “La Luna”, la riqueza (S) oscila entre 17 y 25 especies con  $^2D$  entre 7.3 y 10.2 especies efectivas (Shannon- Wiener entre 1.9 y 2.2), teniendo los valores más altos en los 5 cm superiores de la secuencia.

Las amebas testadas en el lago “La Luna” tuvieron una S entre 2 a 5 y una  $^2D$  entre 1 a 3.5 especies efectivas (Shannon- Wiener entre 0 – 1.26) con su valor más alto a los 10 cm.

Tabla 5. Valores calculados del Índice de la riqueza específica (S), Diversidad Shannon- Wiener (H') y Diversidad verdadera (D) de las diatomeas y amebas testadas en el lago "La Luna" y "El Sol".

| Grupo bioindicador | Lago      | Muestra (cm)/índice de diversidad | 1   | 2   | 3   | 4   | 5    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|--------------------|-----------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Diatomeas          | "La Luna" | S                                 | 13  | 12  | 11  | 9   | 9    | 15  | 15  | 12  | 10  | 13  |
|                    |           | H'                                | 1.9 | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.4  | 1.6 | 1.5 | 1.3 | 1.3 | 1.5 |
|                    |           | <sup>2</sup> D                    | 6.5 | 3.4 | 3.8 | 3.2 | 3.9  | 4.8 | 4.4 | 3.7 | 3.6 | 4.4 |
| Diatomeas          | "El Sol"  | S                                 | 22  | 20  | 22  | 21  | 22   | 23  | 25  | 22  | 18  | 17  |
|                    |           | H'                                | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.1 | 2.3  | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 1.9 |
|                    |           | <sup>2</sup> D                    | 9.2 | 8.8 | 9.4 | 8.2 | 10.1 | 8.1 | 7.7 | 7.3 | 6.8 | 6.9 |
| Amebas Testadas    | "La Luna" | S                                 | -   | 2   | -   | 2   | -    | 4   | -   | 5   | -   | 5   |
|                    |           | H'                                | -   | 0   | -   | 0   | -    | 0.9 | -   | 0.8 | -   | 1.3 |
|                    |           | <sup>2</sup> D                    | -   | 1.0 | -   | 1.0 | -    | 2.5 | -   | 2.3 | -   | 3.5 |

El análisis de grupos de modo Q y modo R, realizado con los taxones de amebas testadas identificadas en el lago “La Luna” (Figura 16), se observa que en el modo Q, las muestras se separan en tres grupos (A, B, C).

El grupo A incluye las muestras correspondientes a los centímetros 8 y 6, en donde destaca la abundancia relativa de ~50% de los *taxa* *D. globulosa* (DG), *D. glans* var. “glans” (DGG) y *Centropyxis constricta* var. “aerophila” (CCA). El grupo B incluye al centímetro 10, en donde hay una baja abundancia relativa (<50%) de todos los *taxa*. El grupo C incluye a los centímetros 2 y 4, en donde hay una mayor abundancia relativa (>90%) de *D. glans* var. “glans” (DGG), y no se registraron los otros *taxa* de amebas.

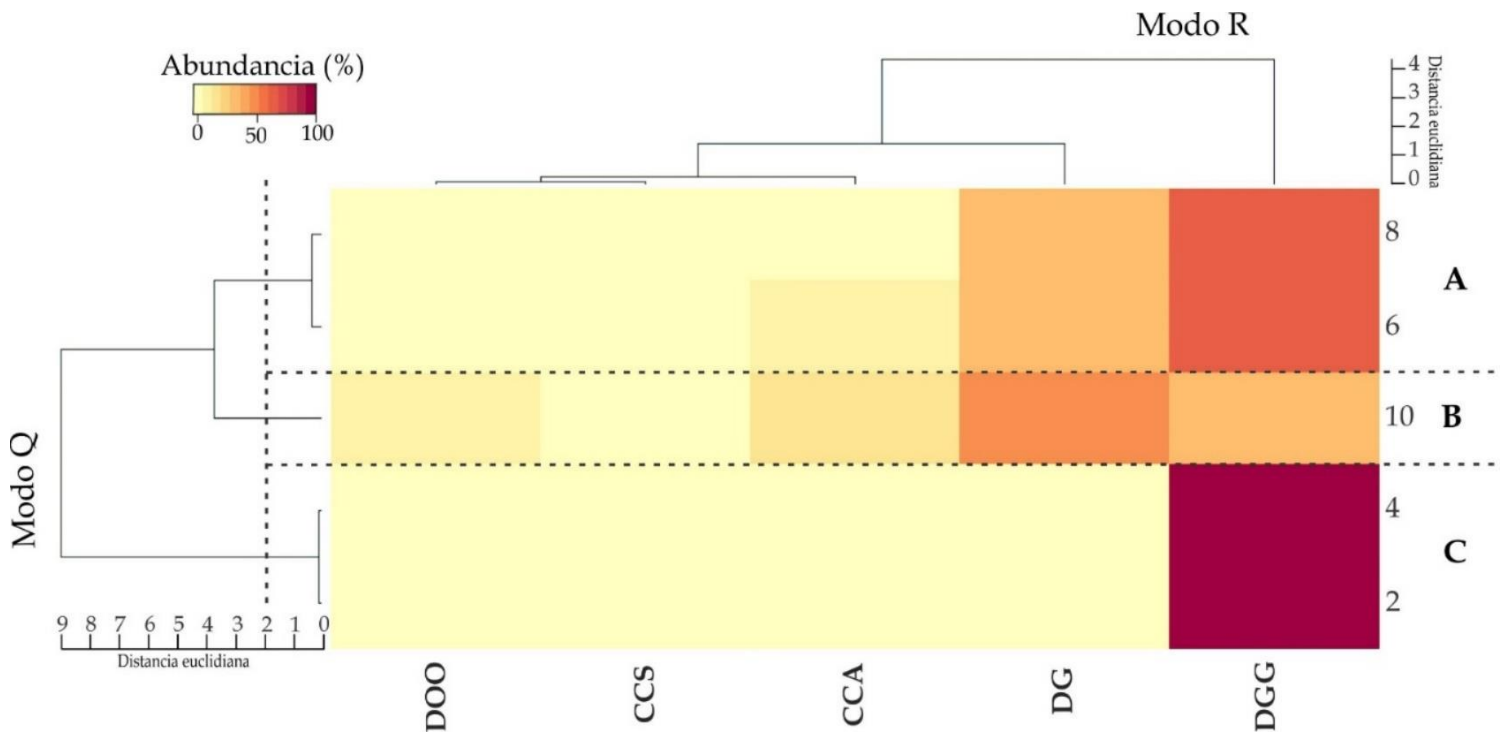


Figura 16. Mapa de calor que representa los resultados del análisis modo Q y R con los *taxa* de amebas testadas. Las líneas punteadas indican la formación de los tres grupos (A, B, C). Claves de cada *taxon*: *Diffugia oblonga* var. “oblonga” (DOO), *Centropyxis constricta* var. “spinosa” (CCS), *Centropyxis constricta* var. “aerophila” (CCA), *Diffugia globulosa* (DG), *Diffugia glans* var. “glans” (DGG).

## 10. DISCUSIÓN

### 10.1 Registro paleolimnológico de los lagos “El Sol” y “La Luna”

#### 10.1.1. Diatomeas del lago “El Sol”

En el lago “El Sol” las especies de diatomeas con mayor abundancia fueron: *Aulacoseria nivaloides*, *Navicula* NTB, *Cavinula pseudoscutifomis*, *Psammothidium levanderi* y *Encyonema perpusillum*. Estas especies son las mismas que ya fueron reportadas en estudios previos de Caballero (1996); Cuna *et al.* (2015); y Hernández-Vásquez (2016) realizados en este lago.

La especie *A. nivaloides* anteriormente se había reportado como *A. distans*, ya que de acuerdo con English y Potatova (2009), las especies denominadas como *A. distans*, más bien corresponden a un grupo de especies ya extintas. Además, la descripción detallada que presentan las autoras corresponde con los ejemplares encontrados en “El Sol”. *A. nivaloides* es una de las diatomeas más abundantes en este lago y ecológicamente se caracteriza por estar presente en cuerpos de agua ácidas (pH ~6) y débilmente mineralizadas. Los óptimos de temperatura en los que se encuentra son de 10.9 a 12.2°C (Joynt III y Wolfe, 2001; Kharitonova y Genkal 2010; Li *et al.*, 2010). Estas condiciones corresponden con las medidas que hay en este lago (Tabla 1).

La especie *Discostella stelligera* fue cuantificada en bajos porcentajes, sin embargo, está presente en todo el registro estudiado desde 1938 a 2013, aproximadamente. *D. stelligera* es una especie que podría sugerir algún incremento en nivel de nutrientes con respecto a sedimentos más antiguos en los que no está presente (Cuna, 2015). No obstante, en el registro sedimentario estudiado en esta tesis no se observa una tendencia de incremento en las últimas décadas. Cabe destacar que *D. stelligera* fue reportada por Cuna, 2015 en su estudio paleolimnológico, en conjunto con la desaparición de la especie endémica de cladóceros *Alonella manueli* y su sustitución por *Daphnia longispina*, *Alona*

*quadrangularis*, *Alonella pulchella* y *Erycerus lamellatus*, lo que atribuye como consecuencia de la introducción de truchas (*Oncorhynchus mykiss*) en lago en los años ~ 1940 a 1950. Esta transición reportada por Cuna, 2015 no se observa el registro de este trabajo, por lo que es posible que todo el registro estudiado en esta tesis sea posterior a la introducción de truchas en este lago.

En la secuencia analizada también se encontraron otros indicadores de incremento de nutrientes. *Nitzschia palea* no se había reportado en estudios anteriores y en este estudio presenta una abundancia baja pero constante (Figura 7), lo que indica que el contenido de carbono orgánico, la concentración de nitrógeno y de fósforo pudieran estar elevándose (McGowan *et al.*, 2018; Laird *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2016). De la misma forma que *D. stelligera*, esta especie no incrementa su abundancia en los sedimentos más recientes, lo que sugiere condiciones ecológicas relativamente estables en el lago desde ~1940.

Otro indicador de incremento en el nivel de nutrientes del lago es el ensamble de Staurosiraceae (*Staurosira construens* var. *venter*, *Staurosirella pinnata* y *Staurosirella* sp.). Este conjunto también presenta una abundancia relativa baja (<5%) y constante a lo largo de la secuencia estudiada. Este grupo de especies se consideran oportunistas, prosperan cuando existen perturbaciones ecológicas (Buczkó *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010; Kuhn *et al.*, 1981). En el caso particular de este estudio, su presencia en asociación con *D. stelligera* y *N. palea* sugiere que ha habido un incremento en la cantidad de nutrientes del lago comparado con los sedimentos más antiguos a 1940 reportados por Cuna 2015, pero su distribución homogénea a lo largo de los sedimentos analizados indica que no ha habido una tendencia hacia un incremento en los nutrientes de este lago desde ~1940.

### 10.1.2. Diatomeas del lago “La Luna”

En este estudio se encontró que en el lago “La Luna” la población de diatomeas se caracterizó por las especies: *Encyonema perpusillum*, *Navicula* NTA y *Psmmothidium helveticum*, las cuales, fueron las más abundantes en toda la secuencia del núcleo LUNA13-IG. Además, se encuentran homogéneamente distribuidas en la secuencia. Dichas especies corresponden con las reportadas en estudios previos de Caballero, 1996, Cuna *et al.*, 2015 y Hernández-Vásquez, 2016.

En el registro sedimentario revisado la especie dominante es *E. perpusillum*, la cual se ha reportado que tiene un óptimo de pH <5.8 y temperatura de 10.2°C (Bigler *et al.*, 2000). En altas concentraciones indica condiciones bajas de pH, ya que es una especie que prefiere las condiciones de aguas más ácidas (Cuna *et al.*, 20013; Bigler *et al.*, 2000), consistente con las características actuales del lago “La Luna”. En este estudio, la concentración de *E. perpusillum* en el centímetro 1 (correspondiente al año 2012-2013), presenta una concentración baja (~16 v/gss), comparada con el resto de la columna sedimentaria. Esta disminución podría estar relacionada con un incremento en el pH (> 6) en el lago, como se reporta en estudios ecológicos actuales. Merino-Ibarra *et al.*, 2015 reportan que, durante el monitoreo de los lagos durante el 2006-2007, en el lago “La Luna” presentó un aumento en el pH asociado con un incremento de la actividad biológica. Cuna *et al.* (2014) reportan que el pH del lago se mantuvo elevado durante los muestreos realizados en 2010, lo que atribuyeron a un aumento en los niveles de fósforo soluble reactivo y a la disminución del nitrógeno en el lago.

En resumen, el conjunto de diatomeas en el lago “La Luna” entre 1959 a 2008 ha sido dominado por las mismas especies acidófilas: *E. perpusillum*, *P. helveticum*, *Navicula* NTA y *S. delicatissima*. Sin embargo, la reciente disminución de *E. perpusillum* en los sedimentos superficiales podría estar asociada con el aumento de pH reportado en los trabajos limnológicos realizados en este lago en años recientes (Merino-Ibarra *et al.*, 2015).

### 10.1.3. Riqueza y Diversidad de diatomeas en los lagos “La Luna” y “El Sol”

En los lagos de alta montaña los valores de riqueza y diversidad de diatomeas suelen ser muy bajos, como los reportados en lagos himalayos y de los Alpes (Füreder *et al.*, 2006; Kammerlander *et al.*, 2015; Filker *et al.*, 2016). Los organismos que se encuentran en estos lagos se han adaptado a condiciones ecológicas consideradas como estresantes, como son bajas temperaturas, pH ácidos, baja concentración de nutrientes, etc. (Gürbüz *et al.*, 2004).

Dentro de este estudio las diatomeas en el lago “El Sol” presentaron diversidades de casi el doble ( ${}^2D$  entre 10 y 7 especies) que en “La Luna” ( ${}^2D$  entre 6.5 y 3 especies) a lo largo de todo el registro estudiado. Esta discrepancia de valores se puede atribuir a que las condiciones en “La Luna” son más estresantes en comparación con “El Sol”, ya que el lago “La Luna” es más pequeño, tiene un pH más bajo y tiene concentraciones de nutrientes más bajas (ultraoligotrófico). En el lago “La Luna”, el valor más alto de los índices de diversidad fue en el primer centímetro ( $H' = 1.9$  y  ${}^2D = 6.5$ ). Este valor puede estar relacionado con el aumento en el pH del lago, que favoreció un incremento en su diversidad. En el lago “El Sol” se tienen valores más altos hacia la cima de la secuencia, entre los años 1996 a 2013 ( $H' = 2.3$  y  ${}^2D = 10.1$ ) y este incremento en la diversidad podría estar asociado con un incremento en su nivel de nutrientes.



#### 10.1.4. Amebas testadas del lago “La Luna”

Las amebas testadas que se registraron en este estudio corresponden a cuatro *taxa* identificados hasta variedad y uno hasta especie. Una de ellas (*Centropyxis constricta* var. “spinosa”), ya había sido reportada en el lago “La Luna” por Sigala *et al.*, 2018, quienes trabajaron con muestras modernas en ambos lagos del Nevado de Toluca. Sin embargo, dentro de este estudio paleolimnológico se registraron por primera vez *Diffflugia globulosa*, *Diffflugia glans* var. “glans”, *Diffflugia oblonga* var. “oblonga” y *Centropyxis constricta* var. “aerophila”. Cabe aclarar que la taxonomía de *Diffflugia globulosa* presenta diversas sinonimias (*D. globulus*, *D. globulus "globulus"*, *D.globularis*). Por lo que, para la interpretación de datos en este estudio, se utilizaron sólo aquellos artículos que tuvieran fotos de microscopía electrónica de barrido, con la finalidad de verificar y corroborar su coincidencia con la especie identificada en este estudio.

Con el análisis de grupos modo Q y modo R, se obtuvo la formación de tres grupos (A, B, C), en estos grupos se observa que existen variaciones en la abundancia relativa de amebas testadas. El grupo B corresponde a la mayor profundidad (10 cm, año 1959), seguido del A (profundidades 8 y 6 cm, años 1975 y 1987) y siendo el C donde se encuentran las menores profundidades (4 y 2 cm, años 1998 y 2008). En el grupo B (10 cm) tiene la mayor abundancia *D. globulosa* y en menor abundancia *D. glans* var. “glans”, *C. constricta* var. “aerophila” y *D. oblonga* var. “oblonga”. La riqueza de especies tuvo el valor más alto de todo el registro sedimentario estudiado y un H' de 1.3. En el grupo A (8 y 6 cm) la mayor abundancia la tiene *D. glans* var. “glans” seguida de *D. globulosa* y en menor abundancia *C. constricta* var. “aerophila”. Este grupo tuvo una riqueza de especies similar al grupo B, pero una H' menor, de 0.8 y 0.9. En el grupo C (4 y 2 cm) prácticamente solo está presente *D. glans* var. “glans”, la riqueza de especies se reduce a la mitad en comparación con los grupos anteriores y también se reduce el valor de H' a 0.

Dado que en este trabajo 4 de los 5 taxones de amebas testadas encontrados representan primeros reportes para el país, la interpretación de este registro se basa principalmente en datos ecológicos reportados para otras regiones geográficas. Las especies encontradas en el registro del lago “La Luna” en su mayoría concuerdan en tener una ecología afín a ambientes oligotróficos, lo que es consistente con las condiciones de bajos nutrientes de este lago. *D. glans* var. “glans”, que es el taxón con mayor presencia en las muestras analizadas, ha sido reportado en todo el mundo en lagos oligotróficos (Paterson *et al.* 2013). La especie *D. globulosa*, se ha reportado en lagos oligotróficos, fríos, con pH ácido, de alta montaña, como en los Cárpatos ucranianos (Kovalchuk y Kovalchuk, 2003) y en dos lagos glaciales de Las Montañas de Rila, en Bulgaria (Todorov y Golemansky, 2000). *C. constricta* var “spinosa” y *C. constricta* var. “aerophila” también son organismos que se han reportado en ambientes lacustres con bajos niveles de nutrientes (Steele *et al.*, 2018; Nasser *et al.*, 2019; Prentice *et al.*, 2018).

Solo la especie *D. oblonga* var. “oblonga” se ha reportado asociada con la presencia de materia orgánica en los sedimentos (Patterson and Kumar, 2002; Kihlman and Kauppila, 2009, McCarthy *et al.*, 1995), por lo que su presencia solo en la base del registro podría estar asociada con la introducción de las truchas (*O. mykiss*) en el lago en los años 40's. (Cuna *et al.*, 2015), sin embargo esta introducción no fue exitosa y tanto las truchas como esta especie de ameba dejaron de existir en el lago “La Luna”.

Lo que es muy notable en el registro de “La Luna” es la pérdida de diversidad desde la base de la secuencia hacia la cima, que involucra la pérdida de todas las especies excepto de *D. glans* var. “glans”. Esto sugiere que en el lago “La Luna” existe un proceso de cambio que ha afectado a las amebas testadas con una mayor intensidad que a las diatomeas, eliminando del registro a especies comunes de condiciones de bajo pH y ambientes fríos como *D. globulosa*, mientras de *D. glans* var “glans” parece ser la única que ha tolerado este cambio. Una posible causa de este cambio podría ser el incremento en la tasa de sedimentación reportado para

esta misma secuencia sedimentaria por Alcocer *et al.* (2020) (Fig. 17) ya que un mayor aporte de sedimentos al lago afectaría directamente el ambiente en el que se desarrollan la amebas testadas, que son en general de hábito bentónico.

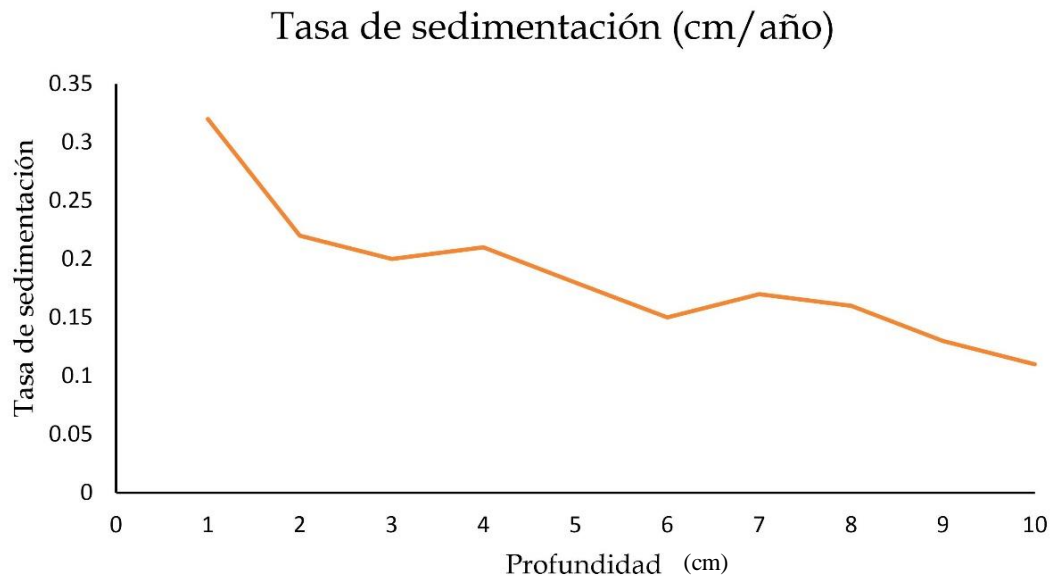


Figura 17. Tasa de sedimentación del lago “La Luna” (Tomado y modificado de Alcocer *et al.* 2020), en donde se observan cambios en la tasa de sedimentación en el lago.

#### 10.1.5. Registro paleolimnológico lago “La Luna”

Con los análisis realizados, fue posible caracterizar tres momentos ecológicos diferentes en el lago “La Luna” durante los últimos ~50 años aproximadamente. La historia del lago se vio reflejada fundamentalmente en los cambios en las amebas testadas, ya que las diatomeas mostraron pocos cambios. Hay que recordar que las perturbaciones ambientales afectarían de forma diferente a cada grupo biológico porque cada grupo de bioindicador tiene una forma de vida diferente además de un nivel de sensibilidad a cambios ambientales distinto. En el caso del lago “La Luna”, las amebas testadas presentaron mayor sensibilidad a los cambios ocurridos en “La Luna”.

Alrededor del año 1959 el lago presentaba condiciones oligotróficas, pero con la presencia de un taxón de ameba testada que indica un mayor contenido de materia orgánica en el sedimento (*D. oblonga* var. "oblonga"). La presencia de esta especie podría reflejar alteraciones en el lago posteriores a la introducción de truchas (*O. mykiss*) ocurrida alrededor de ~ 1940 a 1950, según lo reportado Cuna *et al.*, 2014. Por lo tanto, se sugiere que para este período el lago se está recuperando todavía de las alteraciones asociadas con la presencia de los peces introducidos, los cuales no sobrevivieron por mucho tiempo.

Hasta el año 1987 el conjunto de amebas es diverso e incluye especies de ambientes oligotróficos, ácidos y fríos, sin embargo después de 1987 la diversidad de amebas decae y se restringe únicamente a *D. glans* var. "glans". Además en los sedimentos más recientes a 2008 la diatomea *E. perpusillum* disminuye su abundancia. Estos cambios reflejan alteraciones recientes en el lago "La Luna" que pueden estar asociadas por un lado con el aumento registrado en las tasas de sedimentación en el lago (Alcocer *et al.* 2020) y por otro con el incremento en el pH reportado en estudios limnológicos realizados entre 2006 y 2010 (Merino-Ibarra *et al.*, 2015).

### 10.1.6. Quironómidos del lago “La Luna”

Los resultados de este trabajo sientan las bases para describir una posible nueva especie de quironómido encontrada en el lago “La Luna”. De acuerdo con los antecedentes en este lago se había identificado un quironómido del género *Pagastia*, no obstante, la determinación a ese género fue incorrecta, como se pudo confirmar al examinar el material original colectado por Oseguera *et al.*, 2016. En este material los individuos revisados correspondieron con el género *Pseudodiamesa*, que es el género identificado en este estudio y reportado en un artículo derivado de esta tesis (Moreno *et al.*, 2020, anexo 5). Para confirmar que los ejemplares identificados en el lago “La Luna”, corresponden con una nueva especie haría falta llevar a cabo estudios enfocados a analizar el ciclo de vida completo, así como análisis filogenéticos con material moderno.

El género *Pseudodiamesa* lo integran 12 especies distribuidas biogeográficamente en el hemisferio norte (regiones biogeográficas Neártica, Paleártica y Oriental). Las especies se han dividido taxonómicamente en dos grupos, *Pseudodiamesa branickii* y *P. nivosa*. El primer grupo lo integran únicamente dos especies, *P. branickii* (Nowicki) y *P. pertinax* (Garret) (Ilyashuk *et al.*, 2010). El chironómido registrado en este estudio pertenece al grupo *P. branickii*. En general, las especies que pertenecen a este género se encuentran adaptadas a condiciones ambientales frías, como los lagos de gran altitud (Ilyashuk *et al.*, 2010). En particular las que pertenecen al grupo *P. branickii*, se consideran características de ambientes fríos, pero no glaciales (Lencioni y Rossaro, 2005) y aguas con pH bajo (Bernabò *et al.*, 2010).

El grupo *P. branickii* tiene una amplia distribución geográfica en el hemisferio norte (Nolte y Hoffmann 1992; Oliver, 1959) y se considera parte de la fauna circumpolar, por lo que su presencia en el centro de México parece estar relacionada con fluctuaciones climáticas pasadas y la existencia de condiciones de

transición boreal a lo largo de las tierras altas de México, como una extensión hacia el sur de las Montañas Rocosas de América del Norte (Siciński, 1988).

## 11. CONCLUSIONES

- Se realizó un estudio paleolimnológico sobre de las condiciones ambientales de los últimos ~70 años en el lago “El Sol” mediante el uso de diatomeas como bioindicadores. Para el lago “La Luna” el estudio abarcó los últimos ~50 años e incluyó el análisis de diatomeas y amebas testadas.
- En el lago “El Sol” se identificaron 30 especies de diatomeas distribuidas en 18 géneros. Las más abundantes fueron: *Aulacoseria nivaloides*, *Navicula* NTB, *Cavinula pseudoscutiformis*, *Psammothidium levanderi* y *Encyonema perpusillum*, las cuales corresponden con las especies previamente reportadas para este lago.
- Además de las especies más abundantes antes mencionadas, en el registro del lago “El Sol” también se identificaron en baja abundancia tres especies que indican un aumento en la concentración de nutrientes con respecto a su condición en tiempos anteriores a 1940. Estas especies son: *Discostella stelligera*, *Nitzschia palea* y el ensamble de Staurosiraceae. Sin embargo, a lo largo de la secuencia estudiada, que data entre aproximadamente 1940 a 2013, los porcentajes de estas especies no mostraron cambios notables.
- La composición de diatomeas en el lago “La Luna” se caracterizó por 18 especies distribuidas en 11 géneros. Las especies con mayor concentración en el registro paleolimnológico fueron *Encyonema perpusillum*, *Navicula* NTA y *Psammothidium helveticum*, las cuales corresponden con las especies previamente reportadas para este lago.
- Al comparar la diversidad de especies de diatomeas en los lagos “El Sol” y “La Luna” se observó que “El Sol” siempre presentó mayor diversidad que “La Luna”. La baja diversidad en el lago “La Luna”, se atribuye a su menor tamaño, mayor acidez y bajos niveles de nutrientes.

- La composición de amebas testadas en el lago “La Luna” incluyó 5 *taxa* pertenecientes a dos géneros. Cuatro de ellos representaron primeros registros para estos lagos. Los *taxa* con mayor abundancia fueron *Diffflugia glans* var. “glans”, y *Diffflugia globulosa*. La presencia de *D. oblonga* var. “oblonga” en la base de la secuencia, que data de aproximadamente 1959, sugiere que el lago estaba todavía en un proceso de recuperación de la perturbación asociada con la introducción de truchas en la década anterior (1950s).
- La diversidad de amebas testadas en el lago “La Luna”, que en general fue baja, presenta una reducción drástica hacia la cima de la secuencia. Las especies indicadoras de condiciones de aguas frías y pH bajos desaparecen en los sedimentos posteriores a 1987. *Diffflugia glans* var. “glans” fue el único taxón que estuvo presente a lo largo de todo el registro analizado
- Los quironómidos en el lago “La Luna” tuvieron una abundancia y riqueza de especies baja. Solo se identificó un taxón perteneciente a la subfamilia Diamesinae, género *Pseudodiamesa* y al grupo *Pseudodiamesa branikii*, Sin embargo este es el primer reporte del género para México y posiblemente se trate de una nueva especie.



## **Sugerencias**

- La realización de estudios del ciclo de vida completo de quironómidos y un análisis filogenético con material moderno, para confirmar si se trata de una nueva especie de quironómido.
- La realización de estudios modernos en ambos lagos, en los que se puedan identificar los factores principales que controlan la distribución de amebas testadas, ya que las características físicas y químicas de este lago no son fácilmente comparables con otros sitios de altura.

## 12. LITERATURA CITADA

- Aceves-Quesada, F. (1997). Geología y geomorfología del volcán Nevado de Toluca. s.l.:Tesis para obtener grado de Maestro en Ciencias (Geología). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Aceves-Quesada, F., López-Blanco, J. y Martín del Pozo, A.L., (2006). Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol., 23. pp. 113-124.
- Alcocer, J. (2017). Entre cientos de volcanes, el más extraordinario, en: *Las Aguas Celestiales Nevado de Toluca*. Instituto Nacional de Antropología e Historia; Eds. Pilar Luna, Arturo Montero, Roberto Junco. pp., 187
- Alcocer J., Oseguera L. A., Escobar, E., Peralta, L., y Lugo, A. (2004). Phytoplankton Biomass and Water Chemistry in Two High-Mountain Tropical Lakes in Central Mexico. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 342–346.
- Alcocer, J., Roberson, J., Oseguera, L. A., & Lewis, W. M. (2020a). Rhythmic episodes of heating and cooling control thermal stratification of two tropical high mountain lakes. *Aquatic Sciences*, 82(3).
- Alcocer J., Ruiz-Fernández A.C., Oseguera A., Caballero M., Sanchez-Cabeza J., Hascibe L., Pérez-Bernal, D. Hernández-Rivera M. (2020b). Sediment carbon storage increases in tropical, oligotrophic, high mountain lakes. *Anthropocene*, 32: 100272, <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100272>.
- Ald, S.M., Simpson, A.G., Lane, C.E., Lukeš, J., Bass, D., Bowser, S.S., Brown, M.W., Burki, F., Dunthorn, M., Hampl, V., Heiss, A., Hoppenrath, M., Lara, E., Le Gall, L., Lynn, D.H., McManus, H., Mitchell, E.A., Mozley-Stanridge, S.E., Parfrey LW, Pawlowski J, Rueckert S, Shadwick L, Schoch CL, Smirnov A, Spiegel FW. (2012). The revised classification of eukaryotes. *The Journal of eukaryotic microbiology*.
- Almeida-Leñero, L., M. Escamilla, J. Giménez de Azcárate, A. González-Trápaga, y A.M. Cleef, A. (2007). Vegetación alpina de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Nevado de Toluca. En: Luna, I, J.J. Morrone y D. Espinosa (Eds.). *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana*, UNAM, México, D.F. pag. 179-198. FES-Zaragoza-CONABIO. México, D.F. 514 p. ISBN 978-970-32-4871-1.
- Amezcua-Vargas, (2019). Aspectos Ecológicos de amebas testadas, cladóceros, ostrácodos y quironómidos en dos cuerpos de agua impactados: lago Ocotlito, Chiapas y laguna de Bacalar, Quintana Roo, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 79.
- Arce, J. L., Macías, J. L. y Vazquéz-Selem, L., (2003). The 10.5 ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico: Stratigraphy and hazard implication. *GSA Bulletin*. Vol. 115. pp. 230–248.
- Arce, J. L., (2017). Entre cientos de volcanes, el más extraordinario, en: *Las Aguas Celestiales Nevado de Toluca*. Instituto Nacional de Antropología e Historia; Eds. Pilar Luna, Arturo Montero, Roberto Junco. pp., 187.

- Armienta, M. A., De la Cruz-Reyna, S. y Macías, J. L. (2000). Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichon, and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal*. Vol 97, pp., 105–125.
- Banderas-Tarabay, A., González-Villela, R. y de la Lanza Espino, G., (1991). Limnological aspects of a high-mountain lake in Mexico. *Hydrobiologia*, Kluwer Academic Publishers. Vol. 224. pp. 1-10.
- Battarbee, R., Grytnes, J., Thompson, R., Appleby, P., Catalan, J., Korhola, A., Birks, H., Heegaard, E. y Lami, A., (2002), Comparing palaeolimnological and instrumental evidence of climate change for remote mountain lakes over the last 200 years, *Journal of Paleolimnology*, Kluwer Academic Publishers, pp. 161-179.
- Battarbee, R., Jones, V. J., Flower, R., Cameron, N. G. y Bennion, H., (2001), Diatoms. En: *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Vol. 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Eds: J. P. Smol, H. J. B. Birks & W. M. Last. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. pp. 173-220.
- Beyens, L., y Meisterfeld, R. (2001). Protozoa: Testate Amoebae. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Kluwer Academic Publishers, Vol 3, pp. 153.
- Bigler, C., Hall, R. I., y Renberg, I, (2000). A diatom-training set for palaeoclimatic inferences from lakes in Northern Sweden. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*. Vol. 27, pp., 1-9.
- Boudreau, R. E. A., Galloway, J. M., Patterson, R. T., Kumar, A., & Michel, F. A. (2005). A paleolimnological record of Holocene climate and environmental change in the Temagami region, northeastern Ontario. *Journal of Paleolimnology*, Vol. 33(4), pp. 445-461.
- Bradley, R. S. (2015). Insects and Other Biological Evidence from Continental Regions. Capítulo 11; *Paleoclimatology*. University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts. Elsevier Inc. pp. 377-404.
- Brodersen, K. P. y Anderson, N. J., (2000). Subfossil insect remains (Chironomidae) and lake-water temperature inference in the Sisimiut–Kangerlussuaq region, southern West Greenland. *Geology of Greenland Survey Bulletin*. pp 78–82.
- Buczkó, K., Wojtal, A. Z., Regine, J., (2009) Kobayasiella Species Of The Carpathian Region: Morphology, Taxonomy And Description Of K. *Tintinnus Spec. Nov. Diatom Research*. Vol. 24, pp. 1-21.
- Caballero, M., (1996). The Diatom Flora Of The Two Acid Lakes In Central México. *Diatom Research*. Vol. 11 (2). pp. 227-240.
- 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.
- Camarero, L., (2017), Atmospheric Chemical Loadings in the High Mountain: Current Forcing and Legacy Pollution, *High Mountain Conservation in a Changing World*, Vol. 62, pp. 325-314.
- Catalan, J., Curtis, C. J. y Kerman, M., (2009), Remote European mountain lake ecosystems: regionalisation and ecological status. *Freshwater Biology* , Volumen 54, pp. 2419-2432.

- Catalan, J. L., Camarero, L., Felip, M., Pla, S., Ventura, M., Buchaca, T., Bartumeus, F., Mendoza, G., Miró, A., Casamayor, E. O., Medina- Sánchez, J. M., Bacardit, M., Altuna, M., Bartrons, M. y Díaz De Quijano, D., (2006). High mountain lakes: extreme habitats and witnesses of environmental changes. The ecology of the Iberian inland waters: Home to Ramon Margalef, Volumen 25, pp. 551-584.
- Catalan, J., y Rondón, J. C. (2016). Perspectives for an integrated understanding of tropical and temperate high-mountain lakes. *Journal of Limnology*, 75, pp. 215–234.
- Capra, L., Norini, G., Gropelli, G., Macías, J.L. y Arce J.L. (2008). Volcanic hazard zonation of the Nevado de Toluca volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 176. pp. 469-484.
- Ceballos, G., (2013). Opinión: El Nevado de Toluca y los Parques Nacionales de México. *Oikos*. Consultado en: <http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/todos-los-numeros/numeros-antteriores/104-el-nevado-de-toluca-y-los-parques-nacionales-de-mexico>
- Cuna, E., (2015). Registro de cambios ambientales en dos lagos de alta montaña en México con base en sus algas modernas y fósiles. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 138.
- Cuna, E., Zawisza E., Caballero M., Ruiz-Fernández A. C., Lozano-García M. S. y Alcocer J., (2014). Environmental impacts of Little ice Age cooling in central Mexico recorded in the sediments of a tropical alpine lake. *Journal of Paleolimnol.* Vol. 51. pp. 1-14.
- Curtis, C., Botey, I., Camarero, L., Catalan, J., Cogalniceanu, D., Hughes, M., Kerman, M., Kopáček, J., Korhola, A., Psenner, R., Rogora, M., Stuchl, E. y Veronesi, M., (2005), Acidification in European mountain lake districts: A regional assessment of critical load exceedance, *Aquat. Sci.*, pp. 327-251.
- Charman, D. J., (2001). Biostratigraphic and palaeoenvironmental applications of testate amoebae. *Quaternary Science Reviews*. Vol. 20. pp., 1753-1764.
- CONANP, (2016). Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. pp. 322.
- Cohen, A. S., (2003). Lakes as Archives of Earth History; *Paleolimnology The History and Evolution of Lake Systems*, Oxford University Press, Inc., pp. 3-19.
- D'Antonio, M., Capra, L., Sarocchi, D. y Bellotti, F., (2008). Reconstrucción del evento eruptivo asociado al emplazamiento del flujo piroclástico El Refugio hace 13 ka, volcán Nevado de Toluca (México). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 25. pp. 115-134.
- Depraz, S., Sanial, E., Catalan, A. K. R. y Salinas-Rojas, A., (2017). Less protection for better conservation? A politicised relationship between a city and its protected area in the vicinity of Nevado de Toluca (Mexico). *Journal of Urban Research*. Vol 16.
- Díaz-Roldán. (2013). Diagnósis de la vegetación y flora del Parque Nacional Nevado de Toluca (Estado de México, México) y propuesta para su gestoría. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 77.

- Diario Oficial de la Federación (21 de octubre 2016). Resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría de Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (Primera, segunda y tercera sección) consultado en: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5457780&fecha=21%2F10%2F2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5457780&fecha=21%2F10%2F2016)
- Dimas-Flores, N., Alcocer, J. y Ciros-Pérez, J., (2008). The Structure of the Zooplankton Assemblages from Two Neighboring Tropical High Mountain Lakes. *Journal of Freshwater Ecology*. pp. 21-31.
- Dixit, S. S., Smol, J.P., Kingston, J. C. y Charles, D. F., (1992). Diatoms powerful indicators of environmental change. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 26. No. 1., pp. 22-33.
- English, J. y Potapova, M. (2009) *Aulacoseira pardata* sp. nov., *A. nivalis* comb. nov., *A. nivaloides* comb. et stat. nov., and their occurrences in western North America. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*. Vol. 138, pp. 37–48.
- Eggermont, E. y Heiri, O., (2012) The chironomid-temperature relationship: expression in nature and palaeoenvironmental implications. *Biological Reviews*, Cambridge Philosophical Society. Vol. 87, pp., 430-456.
- Escobar, J.; Brenner, M., Whitmore, T., Kenney, W. y Curtis, J., (2008), Ecology of testate amoebae (thecamoebians) in subtropical Florida lakes., *Journal of Paleolimnology*, pp. 715-731.
- Epler, J. H., (2001). Identification Manual For The Larval Chironomidae (Diptera) Of North And South Carolina. A guide to the taxonomy of the midges of the southeastern United States, Including Florida. Special Publication SJ2001-SP13. North Carolina Department of Environment and Natural Resources Division of Water Quality. pp. 526.
- Filker, S., Sommaruga, R., Vila, I., & Stoeck, T. (2016). Microbial eukaryote plankton communities of high-mountain lakes from three continents exhibit strong biogeographic patterns. *Molecular Ecology*, Vol. 25(10), pp. 2286–2301.
- Fishbein, E., & Patterson, R. T. (1993). Error-weighted maximum likelihood (EWML): a new statistically based method to cluster quantitative micropaleontological data. *Journal of Paleontology*, Vol. 67(3), pp. 475-486.
- Füreder, L., Ettinger, R., Boggero, A., Thaler, B., & Thies, H. (2006). Macroinvertebrate Diversity in Alpine Lakes: Effects of Altitude and Catchment Properties. *Hydrobiologia*, Vol. 562, pp. 123–144.
- García, E., (1973). Modificaciones al sistema de Clasificaciones de Köppen. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 246.
- García-Palomo, A., Macías, J. L. y Garduño, V. H. (2000). Miocene to Recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central Mexico. *Tectonophysics*. Vol. 318. pp. 281-302.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Garduño, V.H. y Espíndola, J.M., (2002), Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, central Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America Map and Chart Series MCH089, 26 p.

- Grimm, E. C. (1992). Tilia software. Illinois State Museum, Springfield.
- Gürbüz, H., Kivrak, E. y Soyupak, S. (2004) Seasonal Changes in Phytoplankton Community Structure in a High Mountain Reservoir, Kuzgun Reservoir, Turkey. *Journal of Freshwater Ecology*. Vol. 19, pp. 651-655.
- Hammer, Ø., Harper, D. A., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electronica*, 4(1), 9.
- Han, L., Xu, B., Qi, F., & Chen, Z. (2016). Effect of nitrogen/phosphorus concentration on algal organic matter generation of the diatom *Nitzschia palea*: Total indicators and spectroscopic characterization. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 47, pp. 130–142.
- Hernández-Vásquez, M. S., (2016). Estudio paleolimnológico con base en asociaciones de diatomeas en el Lago La Luna del Nevado de Toluca. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de licenciatura, pp. 66.
- Holmes, N., Langdon, P. G., Caseldine, C., Brooks, S. J. y Birks, H. J. B., (2011). Merging chironomid training sets: implications for palaeoclimate reconstructions. *Quaternary Science Reviews*. Vol. 30. pp. 2793-2804.
- Holt E.A y Miller S. W., (2010). Bioindicators: Using Organisms to Measure Environment Impacts; *Nature Education Knowledge* 3(10):8.
- Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Makarchenko, E. A. y Heiri, O. (2010). Midges of the genus *Pseudodiamesa* Goetghebuer (Diptera, Chironomidae): current knowledge and palaeoecological perspective. *Journal of the Paleolimnology*. Vol. 44, pp. 667–676.
- Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*. Vol. 113, pp. 363-375.
- Jost, L., González-Oreja, J. A. (2012). Midiendo la diversidad biológica: más allá del índice de Shannon. *Acta zoológica lilloana*. Vol. 56, pp. 3-14.
- Joynt III, E. y Wolfe A. P. (2001). Paleoenvironmental inference models from sediment diatom assemblages in Baffin Island lakes (Nunavut, Canada) and reconstruction of summer water temperature. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol. 58, pp. 1222-1243.
- Kale, A. y Karthick, B., (2015). The Diatoms Big Significance of Tiny Glass Houses. *Resonance*, 20 (10), pp. 919-930.
- Kammerlander, B., Breiner, H.-W., Filker, S., Sommaruga, R., Sonntag, B., & Stoeck, T. (2015). High diversity of protistan plankton communities in remote high mountain lakes in the European Alps and the Himalayan mountains. *FEMS Microbiology Ecology*, Vol. 91(4).
- Kharitonova, G. V., y Genkal, S.I., (2010). Centric Diatom Algae (Centrophyceae) of Ultraoligotrophic Lake Elgygytgyn and Water Bodies of its Basin (Chukotka, Russia). *Inland Water Biology*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–10.
- Kosakyan, A., Gomaa, F., Lara, E., & Lahr, D. J. G. (2016). Current and future perspectives on the systematics, taxonomy and nomenclature of testate amoebae. *European Journal of Protistology*, Vol. 55, pp. 105–117.
- Kovalchuk, A. & Kovalchuk, N., (2003). Protisto- and Microzoobenthos of some High-mountain Lakes from the Svidovets Massif of the Ukrainian Carpathians.

- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1986). Süßwasser flora von Mitteleuropa. Band 2/1: Bacillariophyceae. 2. Teil. Naviculaceae. Gustav Fisher. pp. 586.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1988). Süßwasser flora von Mitteleuropa. Band 2/2: Bacillariophyceae (Epithemiaceae, Sirirellaceae). Gustav Fisher. pp. 596
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1997a). Süßwasser flora von Mitteleuropa. Band 2/2: Bacillariophyceae (Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae). Gustav Fisher. pp. 576.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1997b). Süßwasser flora von Mitteleuropa. Band 2/4: Bacillariophyceae (Achnanthes, Kristiche Ergannzung zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema). Gustav Fisher. pp. 576.
- Kuhn, D., Plafkin, J., Cairns, J., & Lowe, R. (1981). Qualitative Characterization of Aquatic Environments Using Diatom Life-Form Strategies. Transactions of the American Microscopical Society. Vol. 100, pp. 165-182.
- Kumar, A. y Dalby, A. P. (1998). Identification key for holocene lacustrine arcellacean (Thecamoebian) taxa. Palaeontologia Electronica, Vol., 1(1), pp. 1-39.
- Lahr, D.J.G., Grant, J.R. y Katz, (2013). Multigene Phylogenetic Reconstruction of the Tubulinea (Amoebozoa) Corroborates Four of the Six Major Lineages, while Additionally Revealing that Shell Composition Does not Predict Phylogeny in the Arcellinida. Protist. Vol. 164, pp. 323-339
- Laird, K. R., Kingsbury, M. V., & Cumming, B. F. (2010). Diatom habitats, species diversity and water-depth inference models across surface-sediment transects in Worth Lake, northwest Ontario, Canada. Journal of Paleolimnology. Vol. 44, pp. 1009–1024.
- Laprida, C., Massaferro, J., Mercou, J., Cusminsky, G., (2014) Paleobioindicadores Del Fin Del Mundo: Ostrácodos Y Quironómidos Del Extremo Sur De Sudamérica En Ambientes Lacustres Cuaternarios. Latin American Journal Of Sedimentology And Basin Analysis, Vol. 21, pp. 97-117.
- Laurino de Silva, F., Pinho, L. C., Wiedenbrug, S., Dantas, G. P.S., Suri, A., Andersen, T. y Trivinho-Strixino. (2018). Family Chironomidae. en Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates. eds: Neusa Hamada, James H. Thorp y D. Christopher Rogers. Academic Press. ed. 4. Vol. 3. pp. 661-700.
- Leidy, J., (1879), Fresh-water rhizopods of North America, Washington, Government Printing Office, pp. 540.
- Lencioni, V. & Rossaro, B. (2005). Microdistribution of chironomids (Diptera: Chironomidae) in Alpine streams: an autoecological perspective. Hydrobiologia. Vol. 533, pp., 61-76.
- Li, Y.-M., Wang, Y.-F., Li, C.-S., y Ferguson, D. K. (2010). Paleoenvironmental inferences from diatom assemblages of the middle Miocene Shanwang Formation, Shandong, China. Journal of Paleolimnology. Vol. 43, pp. 799–814.
- Lorencová (2009) Thecamoebians from recent lake sediments from the Šumava Mts, Czech Republic. Bulletin of Geosciences 84(2), 359–376.
- Macías, J.L., García P.A., Arce, J.L., Siebe, C. y Espíndola, J.M., (1997). Late Pleistocene-Holocene Cataclysmic Eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitliin Volcanoes, Central Mexico. Byu Geology Studies, Vol., 42. pp. 494-528.

- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la sociedad geológica mexicana. Tomo, LVII, núm. 3, pp. 379-424.
- Mann, D. G. & Droop, J. M., (1996). Biodiversity, biogeography and conservation of diatoms. En: Biogeography of Freshwater Algae. Eds: J. Kristiansen. Kluwer Academic Publishers. pp. 19-32.
- Mann, D., Crawford, R. & Round, F., (2016). Bacillariophyta. *Springer International Publishing AG*.
- Mastretta-Yanes, A., Cao, R., Nicasio-Arzeta, S., Quadri, P., Escalante Espinosa, T., Arredondo, L. y Piñero, D. (2013). Opinión: ¿Será exitosa la estrategia del cambio de categoría para mantener la biodiversidad del Nevado de Toluca? Consultado en: <http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/todos-los-numeros/numeros-anteriores/105-sera-exitosa-la-estrategia-del-cambio-de-categoria-para-mantener-la-biodiversidad-del-nevado-de-toluca>.
- Massaferro, J., Recasens, C., Larocque-Tobler, I., Zolitschka, B., Maidana, N.I., (2012), 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 Reviews*. Vol. 71. pp. 167-174.
- Massaferro, J., Araneda, A. y Motta, L. (2017). Capítulo 9: Diptera: Chironomidae en Paleobioindicadores lacustres neotropicales. Instituto de Geología, UNAM, pp. 163-189.
- McCarthy, F. M. G., Collins, E. S., McAndrews, J. H., Kerr, H. A., Scott, D. B. & Medioli, F.S. (1995). A comparison of postglacial Arcellacean ("Thecamoebian") and pollen succession in Atlantic Canada, illustrating the potential of Arcellaceans for paleoclimatic reconstruction. *Journal of Paleontology*, 69(5): 980-993.
- McGowan, S., Gunn, H. V., Whiteford, E. J., John Anderson, N., Jones, V. J., & Law, A. C. (2018). Functional attributes of epilithic diatoms for palaeoenvironmental interpretations in South-West Greenland lakes. *Journal of paleolimnology*. Vol. 60, pp. 273–298.
- Medioli, F.S. y Scott, D.B., (1988), Lacustrine thecamoebians (mainly arcellaceans) as potential tools for palaeolimnological interpretations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.*, Vol. 62. pp. 361-386.
- Medlin, L. K., y Kaczmarek, (2004). Evolution Of The Diatoms: V. Morphological And Cytological Support For The Major Clades And A Taxonomic Revision. *Phycologia*. Vol. 43, pp. 245-270.
- Merino-Ibarra, E., Alcocer, J. y E. Escobar-Briones, (2015), Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas 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. ISBN 978-607-02-7199-1.
- Mitchell, E. Charman, D.J. y Warner, B., G. (2008). Testate amoebae analysis in ecological and paleoecological studies of wetlands: past, present and future. *Biodivers Conserv*. 17:2115–2137.



- Molino, P. J. y Wetherbee, R., (2008), The biology of biofouling diatoms and their role in the development of microbial slimes. *Biofouling*. Vol. 24 No. 5., pp. 365–379.
- Moreno, C. E., (2001). Métodos para medir la biodiversidad. *M&T–Manuales y Tesis SEA*, vol. 1. Zaragoza, pp. 84.
- Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E. y Pavón, N. P., (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Vol. 82, pp. 1249-1201.
- Moreno, J., Massaferrero, J., Caballero, M. y Oseguera, L., (2020). First record of the *Pseudodiamesa branickii* species group (Diptera: Chironomidae: Diamesinae) from central Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Vol. 91.
- Nasser, N. A, Patterson, R. T., Roe, H. M., Sanei, H., Macumber, A. L. y Neville, L. A., (2016). Lacustrine Arcellinina (Testate Amoebae) as Bioindicators of Arsenic Contamination. *Microbial Ecology*. Vol. 72, pp. 130-149.
- Nasser, N.A., Cullen, J., Patterson, C.W., Patterson, R.T., Roe, H. M. y Gallway, J. M., (2019), Inter-annual Arcellinida (testate lobose amoebae) assemblage dynamics within lacustrine environments. *Limnologica*. Vol. 76. pp. 60-71.
- Nikolaev, S.I., Mitchell, E.A.D., Ptrov, N.B., Berney, C., Fahrni, J., y Pawloski, J., (2005). The Testate Lobose Amoebae (Order Arcellinida Kent, 1880) Finally Find their Home within Amoebozoa. *Protist*, Vol. 156, pp. 191-202.
- Nolte, U. y Hoffmann, T. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* (1992) 26: 309
- Norini, G., Gropelli, G., Capra, L. y De Beni, E., 2004. Morphological analysis of Nevado de Toluca volcano (Mexico): new insights into the structure and evolution of an andesitic to dacitic stratovolcano. *Geomorphology*, Vol. 62, pp., 47-61.
- Ogden, C. G. y Hedley R. H., (1980). *An Atlas Of Freshwater Testate Amoebae*. British Museum (Natural History) Oxford University Press. London. pp. 222.
- Oliver, D. (1959). Some Diamesini (Chironomidae) from the Nearctic and Palaearctic. *Entomologisk Tidskrift*, 80, 48-64.
- Oksanen, J., (2015). *Analysis of Ecological Communities in R: Vegan Tutorial*. Tomado en: <https://www.mooreecology.com/uploads/2/4/2/1/24213970/vegantutor.pdf>.
- Olivera-García, J. y Pichardo I., (2017). Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Retos y oportunidades: Universidad Autónoma del estado de México. México.
- Oseguera, L., Alcocer, J. y Escobar, E., (2016). Macroinvertebrados bentónicos de dos lagos tropicales de alta montaña en el volcán Nevado de Toluca, en la región central de México. *Hidrobiológica*. Vol. 26, pp. 419-432.
- Patterson, R. T., Baker, T., & Burbidge, S. M. (1996). Arcellaceans (thecamoebians) as proxies of arsenic and mercury contamination in northeastern Ontario lakes. *The Journal of Foraminiferal Research*, Vol. 26(2), pp. 172-183.
- Patterson, R. T. y Kumar, A., (2000). Assessment of arcellacean (thecamoebian) assemblages, species, and strains as contaminant indicators in James lake, Northeastern Ontario, Canada. Vol. 30, No. 4, pp. 310-320.

- Patterson, T. R. Kumar, A. (2002). A review of current testate rhizopod (thecamoebian) research in Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. pp. 225-251.
- Patterson, T. R., Dalby, A., Kumar, A., Henderson, L. A., Boudreau, R.E.A, (2002). Arcellaceans (thecamoebians) as indicators of land-use change: settlement history of the Swan Lake area, Ontario as a case study. *Journal of Paleolimnology*, Vo. 28, pp. 297-316.
- Patterson, R. T., Lamoureux, E. D. R., Neville, L. A. y Macumber, A. L., (2012a). Arcellacea (Testate Lobose Amoebae) as pH Indicators in a Pyrite Mine-Acidified Lake, Northeastern Ontario, Canada. *Microbiology Of Aquatic Systems*. Vol. 65, pp. 541.
- Patterson, R. T., Roe, H. M. y Swindles, G. T., (2012b). Development of an Arcellacea (testate lobose amoebae) based transfer function for sedimentary Phosphorus in lakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol. 348-349. pp. 32-44.
- Patterson R. T., Lamoureux E. D. R., Neville L. A. & Macumber A. L. (2013). Arcellacea (Testate lobose amoebae) as pH indicators in a pyrite mine-acidified lake, Northeastern Ontario, Canada. *Microbial Ecology*, 65(3), 541-554.
- Prentice, S., Roe, H. M., Bennion, C. D., Sayer, C.D. y Salgado, J., (2018). Refining the palaeoecology of lacustrine testate amoebae: Insights from a plant macrofossil record from a eutrophic Scottish lake. *Journal of Paleolimnology*. Vol. 60, pp. 189-207.
- Porinchua, D. y MacDonaldb, G. M. (2003). The use and application of freshwater midges (Chironomidae: Insecta: Diptera) in geographical research. The use and application of freshwater midges (Chironomidae: Insecta: Diptera) in geographical research. *Progress in Physical Geography*. pp. 378-422.
- Quesada, J., Martin Del Pozzo, A. L., & Blanco, J. L. (2007). Volcanic hazards zonation of the Nevado de Toluca Volcano, Central Mexico. *Natural Hazards*. Vol. 41 pp. 159–180.
- Reinhardt, E. G., Dalby, A.P., Kumar, A. y Patterson, R. T., (1998). Arcellaceans as Pollution Indicators in Mine Tailing Contaminated Lakes near Cobalt, Ontario, Canada. Vol. 44. No. 2. pp., 131-148.
- Roe, H. M. & Patterson, T. R. (2014). Arcellacea (Testate Amoebae) as Bio-indicators of Road Salt Contamination in Lakes. *Microbial Ecology*. Vol. 68, pp. 299-313.
- Ruiz-Cordova, J., Lozano-García, S., Caballero, M., Figueroa-Rangel, B. L., Sosa-Nájera, S., Hernández-Vázquez, M. S., (2019). Historia de la vegetación, ambiente y evidencia de actividad humana de los últimos 6,000 años en el lago alpino La Luna, Nevado de Toluca. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. Vol. 90.
- Sánchez-Cabeza, J.A. y Ruíz-Fernández, A.C., (2012). 210Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 82, pp. 183-200.
- Siciński, J. (1988). New data on the rare species *Pseudodiamesa nivosa* (Goetghebuer)(Diptera, Chironomidae). *Aquatic insects*, 10(2), 73-76.

- Sigala, I., Lozano-García, S., Escobar, J., Pérez, L. y Gallegos-Neyra, E., (2015). Testate Amoebae (Amebozoa: Arcellinida) in Tropical Lakes of Central Mexico. *Biología Tropical*. Vol., 64. pp., 377-397.
- Sigala-Regalado, I., (2017). *Ecología de Amebas Testadas (Amoebzoa: Acellinida) de cuerpos de agua del centro de México y su uso para la reconstrucción paleoambiental de los últimos 350 años en el lago de Atezca, Hidalgo*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 104.
- Sigala, I., Lozano-García, S., Pérez, L., Caballero, M., Lugo-Vázquez, A., (2018). Ecological drivers of Testate Amoebae diversity in tropical water bodies of central Mexico. *Journal of Limnology*. Vol. 77, pp. 385-399.
- Simpson, K. W. y Bode, R. W., (1980). *Common Larvae of Chironomidae (DIPTERA) from New York State Streams and Rivers with particular reference to the fauna of artificial substrates*. New York State Education Department. USA.
- Smith, H. G., Bobrov, A. y Lara, E., (2007), Diversity and biogeography of testate amoebae, *Biodiversity and Conservation*, Vol. 17, pp. 329–343
- SMN. (2019). Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Normales Climatológicas (online) disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/emas/>
- Smol, J. P., (2017). Paleolimnology. *Encyclopedia of Inland Waters; Earth Systems and Environmental Sciences* pp. 462-471.
- Sterrenburg F.A.S., Gordon R., Tiffany M.A. y Nagy S.S. (2007) Diatoms. En: *Algae and Cyanobacteria in Extreme Environments. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*, eds: Seckbach J., vol 11. Springer, Dordrecht.
- Steele, R. E., Nasser, N. A., Patterson, T. R., Gregory, B.R.B. y Roe, H. M., (2018). An Assessment of Sub-Meter Scale Spatial Variability of Arcellinida (Testate Lobose Amoebae) Assemblages in a Temperate Lake: Implications for Limnological Studies. *Microbial Ecology*. Vol. 76, pp., 680-694.
- Steinmann, V. W., Ramírez-Amezcuca, Y., Arredondo-Amezcuca, L. y R. A., Hernández-Cárdenas. (2017). *Flora Alpina del Centro de México*. Instituto de Ecología, A. C. Centro Regional del Bajío. Informe final-SNIB-CONABIO proyecto JF076. Ciudad de México.
- Todorov, M. y Golemansky, V., (2000). Testate Amoebae (Protozoa: Testacea) of the Glacial Lakes in the Rila National Park (Southwestern Bulgaria). *Biodiversity and Evolution of glacial water ecosystems in Rila Mountains*. pp. 15-26
- Trappeniers, K., van Kerckvoorde, A., Chardez, D., Nijs, I., & Beyens, L. (1999). Ecology of testate amoebae communities from aquatic habitats in the Zackenberg area (Northeast Greenland). *Polar Biology*, 22(4), 271–278.
- Walker, I. R., (1987). Chironomidae (Diptera) In *Paleoecology*. *Quaternary Science Reviews*. Vol. 6, pp. 29-40.
- Zawisza E., Caballero M., Ruiz-Fernandez C., (2012). Ecological changes recorded in the sediments of highaltitude tropical lake Lago de la Luna (central Mexico) based on subfossil Cladocera analysis. *Studia Quaternaria* 29: 14-21.
- Zawisza, E.; Cuna, E.; Caballero, M.; Ruíz-Fernández, A.; Szeroczyńska, K.; Woszczyk, K.; Zawiska, I., (2017). Environmental changes during the last millennial

recorded in subfossil Cladocera, diatoms and sediment geochemistry from Lake El Sol (Central Mexico). *Geological Quarterly*. pp. 18-37.

- Zurzolo, C. y Bowler, C., (2001). Exploring Bioinorganic Pattern Formation in Diatoms.. A Story of Polarized Trafficking. *Plant Physiology*, 127(4), p. 1339–1345.

### 13. Anexos

#### Anexo 1

Tabla A. Conteos de valvas de diatomeas del lago "El Sol". Sedimentos del núcleo Sol 12-IG

| Sol 13-IG                         |                                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Especies                          | Profundidad dentro del núcleo (cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                                   | 1                                  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| <i>Aulacoseria distans</i>        | 207                                | 116 | 159 | 222 | 265 | 273 | 270 | 219 | 202 | 247 |
| <i>Caloneis aerophila</i>         | 2                                  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| <i>Cavinula pseudoscutiformis</i> | 84                                 | 48  | 77  | 124 | 133 | 83  | 121 | 85  | 132 | 143 |
| <i>Cymbella cymbiformis</i>       | 3                                  | 0   | 0   | 2   | 3   | 3   | 2   | 0   | 0   | 0   |
| <i>Discotella stalligera</i>      | 3                                  | 3   | 5   | 7   | 7   | 4   | 1   | 1   | 0   | 1   |
| <i>Encyonema perpusillum</i>      | 69                                 | 36  | 68  | 78  | 132 | 124 | 120 | 96  | 135 | 143 |
| Especie no identificada           | 0                                  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 4   | 3   | 0   | 0   |
| <i>Fragilaria pinnata</i>         | 3                                  | 3   | 11  | 9   | 17  | 6   | 5   | 10  | 10  | 12  |
| <i>Fragilaria sp.</i>             | 6                                  | 0   | 13  | 0   | 0   | 4   | 11  | 1   | 3   | 8   |
| <i>Frustulia rhomboides</i>       | 4                                  | 5   | 11  | 6   | 12  | 16  | 7   | 11  | 11  | 4   |
| <i>Gomphonema gracilie</i>        | 0                                  | 0   | 3   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   |
| <i>Navicula cyptotenella</i>      | 12                                 | 1   | 5   | 6   | 22  | 8   | 1   | 2   | 0   | 0   |
| <i>Navicula NTA</i>               | 6                                  | 5   | 2   | 6   | 9   | 10  | 16  | 3   | 5   | 9   |

|   |     |     |     |     |      |     |      |     |     |      |
|---|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|------|
| <i>Navicula NTB</i>   | 99  | 78  | 103 | 147 | 191  | 230 | 310  | 225 | 264 | 326  |
| <i>Nitzschia palea</i>  | 0   | 1   | 2   | 3   | 0    | 3   | 17   | 4   | 2   | 8    |
| <i>Pinnularia aff. vidiris</i>                                    | 1   | 2   | 1   | 0   | 3    | 1   | 1    | 2   | 0   | 0    |
| <i>Pinnularia borealis</i>  | 1   | 0   | 0   | 0   | 0    | 1   | 0    | 0   | 0   | 0    |
| <i>Pinnularia diregentissima</i>                                  | 0   | 0   | 2   | 0   | 0    | 2   | 3    | 5   | 3   | 8    |
| <i>Pinnularia divergens</i> var. <i>subbacillaris</i><br>nov. Var | 0   | 1   | 0   | 0   | 0    | 0   | 2    | 0   | 1   | 0    |
| <i>Pinnularia microstauron</i>                                    | 7   | 1   | 3   | 6   | 17   | 8   | 6    | 5   | 8   | 10   |
| <i>Pinnularia</i> sp.   | 0   | 0   | 0   | 1   | 5    | 0   | 0    | 0   | 0   | 0    |
| <i>Planothidium lanceolatum</i>                                   | 5   | 6   | 7   | 3   | 3    | 2   | 6    | 5   | 2   | 7    |
| <i>Psmmothidium helveticum</i>                                    | 19  | 14  | 11  | 11  | 41   | 6   | 5    | 7   | 12  | 17   |
| <i>Psmmothidium levanderi</i>                                     | 69  | 46  | 79  | 65  | 104  | 65  | 56   | 61  | 58  | 70   |
| <i>Sirirella linearis</i>   | 23  | 5   | 2   | 20  | 50   | 16  | 12   | 2   | 3   | 0    |
| <i>Stauroneis</i> sp.   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2    | 0   | 0    | 0   | 0   | 0    |
| <i>Staurosira construens</i> var. <i>Venter</i>                   | 27  | 13  | 30  | 37  | 47   | 25  | 24   | 14  | 42  | 13   |
| <i>Staurosirella construens</i>                                   | 5   | 0   | 0   | 4   | 1    | 0   | 0    | 0   | 0   | 0    |
| <i>Stenopterobia delicatissima</i>                                | 15  | 10  | 12  | 7   | 20   | 28  | 29   | 22  | 2   | 16   |
| <i>Surirella</i> sp.  | 0   | 8   | 2   | 1   | 9    | 13  | 2    | 3   | 0   | 0    |
| Total:  | 670 | 402 | 608 | 765 | 1093 | 931 | 1032 | 786 | 895 | 1042 |

Tabla A1. Abundancia relativa de diatomeas del lago "El Sol". Sedimentos del núcleo Sol 13-IG

| <b>SOL 13-IG</b>                  |                                    |          |          |          |          |          |          |          |          |           |
|-----------------------------------|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Especies                          | Profundidad dentro del núcleo (cm) |          |          |          |          |          |          |          |          |           |
|                                   | <b>1</b>                           | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7</b> | <b>8</b> | <b>9</b> | <b>10</b> |
| <i>Aulacoseria distans</i>        | 30.90                              | 28.86    | 26.15    | 29.02    | 24.22    | 29.32    | 26.16    | 27.86    | 22.57    | 23.70     |
| <i>Caloneis aerophila</i>         | 0.30                               | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| <i>Cavinula pseudoscutiformis</i> | 12.54                              | 11.94    | 12.66    | 16.21    | 12.16    | 8.92     | 11.72    | 10.81    | 14.75    | 13.72     |
| <i>Cymbella cymbiformis</i>       | 0.45                               | 0.00     | 0.00     | 0.26     | 0.27     | 0.32     | 0.19     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| <i>Discotella stalligera</i>      | 0.45                               | 0.75     | 0.82     | 0.92     | 0.64     | 0.43     | 0.10     | 0.13     | 0.00     | 0.10      |
| <i>Encyonema perpusillum</i>      | 10.30                              | 8.96     | 11.18    | 10.20    | 12.07    | 13.32    | 11.63    | 12.21    | 15.08    | 13.72     |
| Especie no identificada           | 0.00                               | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.39     | 0.38     | 0.00     | 0.00      |
| <i>Fragilaria pinnata</i>         | 0.45                               | 0.75     | 1.81     | 1.18     | 1.55     | 0.64     | 0.48     | 1.27     | 1.12     | 1.15      |
| <i>Fragilaria sp.</i>             | 0.90                               | 0.00     | 2.14     | 0.00     | 0.00     | 0.43     | 1.07     | 0.13     | 0.34     | 0.77      |
| <i>Frustulia rhomboides</i>       | 0.60                               | 1.24     | 1.81     | 0.78     | 1.10     | 1.72     | 0.68     | 1.40     | 1.23     | 0.38      |
| <i>Gomphonema gracilie</i>        | 0.00                               | 0.00     | 0.49     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.10     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| <i>Navicula cyptotenella</i>      | 1.79                               | 0.25     | 0.82     | 0.78     | 2.01     | 0.86     | 0.10     | 0.25     | 0.00     | 0.00      |
| <i>Navicula NTA</i>               | 0.90                               | 1.24     | 0.33     | 0.89     | 0.82     | 1.07     | 1.55     | 0.38     | 0.56     | 0.86      |
| <i>Navicula NTB</i>               | 14.78                              | 19.40    | 16.94    | 19.22    | 17.46    | 24.70    | 30.04    | 28.63    | 29.50    | 31.29     |
| <i>Nitzschia palea</i>            | 0.00                               | 0.25     | 0.33     | 0.39     | 0.00     | 0.32     | 1.65     | 0.51     | 0.22     | 0.77      |
| <i>Pinnularia aff. vidiris</i>    | 0.15                               | 0.50     | 0.16     | 0.00     | 0.27     | 0.11     | 0.10     | 0.25     | 0.00     | 0.00      |

|   |        |        |        |         |         |         |         |        |          |         |
|---|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|----------|---------|
| <i>Pinnularia borealis</i>  | 0.15   | 0.00   | 0.00   | 0.00    | 0.00    | 0.11    | 0.00    | 0.00   | 0.00     | 0.00    |
| <i>Pinnularia diregentissima</i>                                  | 0.00   | 0.00   | 0.33   | 0.00    | 0.00    | 0.21    | 0.29    | 0.64   | 0.34     | 0.77    |
| <i>Pinnularia divergens</i> var.<br><i>subbacillaris</i> nov. Var | 0.00   | 0.25   | 0.00   | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.19    | 0.00   | 0.11     | 0.00    |
| <i>Pinnularia microstauron</i>                                    | 1.04   | 0.25   | 0.49   | 0.89    | 1.55    | 0.86    | 0.58    | 0.64   | 0.89     | 0.96    |
| <i>Pinnularia</i> spp.  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.13    | 0.46    | 0.00    | 0.00    | 0.00   | 0.00     | 0.00    |
| <i>Planothidium lanceolatum</i>                                   | 0.75   | 1.49   | 1.15   | 0.39    | 0.27    | 0.21    | 0.58    | 0.64   | 0.22     | 0.67    |
| <i>Psmmothidium helveticum</i>                                    | 2.84   | 3.48   | 1.81   | 1.44    | 3.75    | 0.64    | 0.48    | 0.89   | 1.34     | 1.63    |
| <i>Psmmothidium levanderi</i>                                     | 10.30  | 11.44  | 12.99  | 8.50    | 9.51    | 6.98    | 5.43    | 7.76   | 6.48     | 6.72    |
| <i>Surirella linearis</i>   | 3.43   | 1.24   | 0.33   | 2.61    | 4.57    | 1.72    | 1.16    | 0.25   | 0.34     | 0.00    |
| <i>Stauroneis</i> spp.  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00    | 0.18    | 0.00    | 0.00    | 0.00   | 0.00     | 0.00    |
| <i>Staurosira construens</i> var.<br><i>venter</i>                | 4.03   | 3.23   | 4.93   | 4.84    | 4.30    | 2.69    | 2.33    | 1.78   | 4.69     | 1.25    |
| <i>Staurosirella</i> cf. <i>construens</i>                        | 0.75   | 0.00   | 0.00   | 0.52    | 0.09    | 0.00    | 0.00    | 0.00   | 0.00     | 0.00    |
| <i>Stenopterobia delicatissima</i>                                | 2.24   | 2.49   | 1.97   | 0.92    | 1.83    | 3.01    | 2.81    | 2.80   | 0.22     | 1.54    |
| <i>Surirella</i> spp.   | 0.00   | 1.99   | 0.33   | 0.13    | 0.82    | 1.40    | 0.19    | 0.38   | 0.00     | 0.00    |
| Abundancia total  | 394.63 | 4783.8 | 3617.6 | 2252.92 | 3221.83 | 2741.79 | 3039.24 | 701.50 | 7987.875 | 9206.07 |



Anexo 2

Tabla B. Conteos de valvas de diatomeas del lago "La Luna". Sedimentos de núcleo Luna 13-IG

| Luna13-IG                         |                                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Especies                          | Profundidad dentro del núcleo (cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                                   | 1                                  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| <i>Aulacoseira distans</i>        | 12                                 | 16  | 0   | 16  | 3   | 13  | 10  | 0   | 0   | 0   |
| <i>Caloneis aerophila</i>         | 0                                  | 1   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 2   | 1   | 1   |
| <i>Cavinula pseudoscutiformis</i> | 4                                  | 4   | 0   | 0   | 0   | 2   | 3   | 0   | 4   | 0   |
| <i>Cymbella naviculiformis</i>    | 16                                 | 2   | 1   | 0   | 0   | 0   | 2   | 0   | 0   | 0   |
| <i>Encyonema perpusillum</i>      | 316                                | 427 | 222 | 739 | 364 | 453 | 351 | 362 | 646 | 422 |
| <i>Eunotia sp.1</i>               | 24                                 | 0   | 1   | 0   | 0   | 4   | 3   | 2   | 0   | 3   |
| <i>Frustulia rhomboides</i>       | 0                                  | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| <i>Luticola mutica</i>            | 4                                  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| <i>Navicula NTA</i>               | 88                                 | 49  | 64  | 78  | 64  | 103 | 70  | 97  | 142 | 153 |
| <i>Navicula NTB</i>               | 0                                  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 3   | 1   | 0   | 4   |
| <i>Hantzschia amphioxys</i>       | 0                                  | 0   | 1   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 1   |
| <i>Pinnularia aff. vidiris</i>    | 20                                 | 4   | 2   | 13  | 12  | 8   | 10  | 6   | 15  | 9   |
| <i>Pinnularia borealis</i>        | 0                                  | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 1   | 0   | 2   |
| <i>Pinnularia microstauron</i>    | 12                                 | 3   | 2   | 8   | 6   | 5   | 1   | 1   | 9   | 4   |
| <i>Psammothidium helveticum</i>   | 84                                 | 42  | 89  | 77  | 69  | 118 | 62  | 68  | 117 | 144 |

|                                    |     |     |     |      |     |     |     |     |      |     |
|------------------------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| <i>Psammothidium levanderi</i>     | 72  | 48  | 15  | 50   | 46  | 71  | 35  | 28  | 22   | 21  |
| <i>Surirella linearis</i>          | 20  | 3   | 1   | 13   | 7   | 24  | 17  | 10  | 30   | 23  |
| <i>Stenopterobia delicatissima</i> | 56  | 30  | 25  | 63   | 40  | 60  | 33  | 30  | 55   | 60  |
| Total                              | 728 | 629 | 423 | 1057 | 611 | 865 | 602 | 608 | 1041 | 847 |

Tabla B1. Concentración de diatomeas del lago "La Luna". Sedimentos del núcleo Luna 13-IG

| <b>Luna13-IG</b>                  |                                    |          |          |          |          |          |          |          |          |           |
|-----------------------------------|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Especies                          | Profundidad dentro del núcleo (cm) |          |          |          |          |          |          |          |          |           |
|                                   | <b>1</b>                           | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7</b> | <b>8</b> | <b>9</b> | <b>10</b> |
| <i>Aulacoseira distans</i>        | 1.41                               | 3.85     | 0        | 1.88     | 0.35     | 3.06     | 1.18     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| <i>Caloneis aerophila</i>         | 0.00                               | 0.24     | 0        | 0.00     | 0.00     | 0.24     | 0.12     | 0.24     | 0.12     | 0.24      |
| <i>Cavinula pseudoscutiformis</i> | 0.20                               | 0.96     | 0        | 0.00     | 0.00     | 0.47     | 0.35     | 0.00     | 0.49     | 0.00      |
| <i>Cymbella naviculiformis</i>    | 0.81                               | 0.48     | 0.714    | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.24     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| <i>Encyonema perpusillum</i>      | 15.96                              | 102.65   | 158.508  | 87.05    | 42.88    | 106.73   | 41.35    | 42.64    | 79.27    | 99.42     |
| <i>Eunotia sp.1</i>               | 1.21                               | 0.00     | 0.714    | 0.00     | 0.00     | 0.94     | 0.35     | 0.24     | 0.00     | 0.71      |
| <i>Frustulia rhomboides</i>       | 0.00                               | 0.00     | 0        | 0.00     | 0.00     | 0.24     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| <i>Luticola mutica</i>            | 0.20                               | 0.00     | 0        | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00      |
| <i>Navicula NTA</i>               | 4.45                               | 11.78    | 45.696   | 9.19     | 7.54     | 24.27    | 8.25     | 11.43    | 17.42    | 36.05     |
| <i>Navicula NTB</i>               | 0.00                               | 0.00     | 0        | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.35     | 0.12     | 0.00     | 0.94      |

|                                    |       |        |        |        |       |        |       |       |        |        |
|------------------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|
| <i>Hantzschia amphioxys</i>        | 0.00  | 0.00   | 0.714  | 0.00   | 0.00  | 0.24   | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.24   |
| <i>Pinnularia aff. vidiris</i>     | 1.01  | 0.96   | 1.428  | 1.53   | 1.41  | 1.88   | 1.18  | 0.71  | 1.84   | 2.12   |
| <i>Pinnularia borealis</i>         | 0.00  | 0.00   | 0      | 0.00   | 0.00  | 0.24   | 0.12  | 0.12  | 0.00   | 0.47   |
| <i>Pinnularia microstauron</i>     | 0.61  | 0.72   | 1.428  | 0.94   | 0.71  | 1.18   | 0.12  | 0.12  | 1.10   | 0.94   |
| <i>Psammothidium helveticum</i>    | 4.24  | 10.10  | 63.546 | 9.07   | 8.13  | 27.80  | 7.30  | 8.01  | 14.36  | 33.93  |
| <i>Psammothidium levanderi</i>     | 3.64  | 11.54  | 10.71  | 5.89   | 5.42  | 16.73  | 4.12  | 3.30  | 2.70   | 4.95   |
| <i>Surirella linearis</i>          | 1.01  | 0.72   | 0.714  | 1.53   | 0.82  | 5.65   | 2.00  | 1.18  | 3.68   | 5.42   |
| <i>Stenopterobia delicatissima</i> | 2.83  | 7.21   | 17.85  | 7.42   | 4.71  | 14.14  | 3.89  | 3.53  | 6.75   | 14.14  |
| Abundancia total                   | 85.76 | 151.22 | 302.02 | 124.51 | 71.98 | 203.79 | 70.92 | 71.62 | 127.74 | 199.55 |

Anexo 3

Tabla C. Conteos de amebas testadas en 2cm<sup>3</sup> de sedimentos del lago "La Luna". Sedimentos de núcleo Luna 13-IG

| Luna13-IG  |                  |     |     |     |     |
|--|------------------|-----|-----|-----|-----|
| Taxa   | Profundidad (cm) |     |     |     |     |
|  | 2                | 4   | 6   | 8   | 10  |
| <i>Centropyxis constricta</i><br>var "aerophila" | 0                | 0   | 18  | 15  | 55  |
| <i>Centropyxis constricta</i><br>var "spinosa"   | 0                | 0   | 10  | 9   | 13  |
| <i>Diffugia glans</i> var<br>"glans"             | 215              | 292 | 207 | 349 | 120 |
| <i>Diffugia globulosa</i>                        | 0                | 0   | 92  | 166 | 172 |
| <i>Diffugia oblonga</i> var<br>"oblonga"         | 2                | 1   | 0   | 3   | 17  |
| Total  | 217              | 293 | 327 | 542 | 377 |

Tabla C1. Conteos de amebas testadas en 2cm<sup>3</sup> de sedimentos del lago "La Luna". Sedimentos de núcleo Luna 13-IG

| Luna13-IG  |                  |       |       |       |       |
|--|------------------|-------|-------|-------|-------|
| Taxa   | Profundidad (cm) |       |       |       |       |
|  | 2                | 4     | 6     | 8     | 10    |
| <i>Centropyxis constricta</i><br>var "aerophila" | 0.00             | 0.00  | 5.50  | 2.77  | 14.59 |
| <i>Centropyxis constricta</i><br>var "spinosa"   | 0.00             | 0.00  | 3.06  | 1.66  | 3.45  |
| <i>Diffugia glans</i> var<br>"glans"             | 99.08            | 99.66 | 63.30 | 64.39 | 31.83 |
| <i>Diffugia globulosa</i>                        | 0.00             | 0.00  | 28.13 | 30.63 | 45.62 |
| <i>Diffugia oblonga</i> var<br>"oblonga"         | 0.92             | 0.34  | 0.00  | 0.55  | 4.51  |

Anexo 4

Tabla D. Conteos de cápsulas cefálicas de quironómidos 2cm<sup>3</sup> de sedimentos del lago “La Luna”. Sedimentos de núcleo Luna 13-IG

---

| Luna13-IG     |                  |   |    |    |    |
|---------------|------------------|---|----|----|----|
| Taxa          | Profundidad (cm) |   |    |    |    |
|               | 2                | 4 | 6  | 8  | 10 |
| Pseudodiamesa | 8                | 7 | 10 | 16 | 21 |



Taxonomy and systematics

**First record of the *Pseudodiamesa branickii* species-group (Diptera: Chironomidae: Diamesinae) from central Mexico**

***Primer registro del grupo *Pseudodiamesa branickii* (Diptera: Chironomidae: Diamesinae) del centro de México***

Joanna Moreno <sup>a, b</sup>, Julieta Massafiero <sup>c</sup>, Margarita Caballero <sup>a, \*</sup>, Luis Oseguera <sup>d</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio de Paleolimnología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México City, Mexico

<sup>b</sup>Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México City, Mexico

<sup>c</sup>Programa de Conservación de la Biodiversidad del Parque Nacional Nahuel Huapi/ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Fagnano 244, 8400 Bariloche, Argentina

<sup>d</sup>Proyecto de Limnología Tropical, Facultad de Estudios Superiores-Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. De los Barrios Ním. 1, 54090 Tlalnepantla, Estado de México, Mexico

\*Corresponding author: [maga@igeofisica.unam.mx](mailto:maga@igeofisica.unam.mx) (M. Caballero)

Received: 1 October 2019; accepted: 19 February 2020

**Abstract**

Larvae and pupae of the *Pseudodiamesa branickii* species-group (Makarchenko & Makarchenko, 1999) (Diptera: Chironomidae) were found in 2 high-altitude lakes (El Sol and La Luna, 4,200 m asl), in the crater of the Nevado de Toluca volcano, in central Mexico. This is the first record of the genus in Mexico, and its southernmost report from a location that represents a transitional zone between the Nearctic and Neotropical regions. New information on the ecology and biogeographical distribution of the species-group is given.

**Keywords:** Tropical high-altitude lakes; Benthos; Biodiversity

**Resumen**

Se identificaron ejemplares de larvas y pupas del grupo *Pseudodiamesa branickii* (Makarchenko y Makarchenko, 1999) (Diptera: Chironomidae) en 2 lagos de altura (El Sol y La Luna, 4,200 m snm), ubicados dentro del cráter del volcán Nevado de Toluca, en el centro de México. Este es el primer reporte para México y la localización más austral del género, en una zona transicional entre las regiones Neártica y Neotropical. Se presenta nueva información sobre la ecología y la distribución biogeográfica de este grupo.

**Palabras clave:** Lagos tropicales de altura; Bentos; Biodiversidad

ISSN versión electrónica: 2007-8706; Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (4.0) <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3228>

## Introduction

*Pseudodiamesa* Goetzghebuer (1939) is a genus containing 12 species distributed in the Northern Hemisphere (Nearctic, Palearctic and Oriental regions). All of them are adapted to cold environments such as high-altitude or high-latitude lakes or found in the sedimentary (sub-fossil) record, correlating with past glacial phases (Ilyashuk et al., 2010). Based on the morphology of the adult male, Oliver (1959) divided this genus into 2 subgenera, *Pachydiamesa* and *Pseudodiamesa*. Later on, using different morphological characters of the larval head capsules Makarchenko and Makarchenko (1999) suggested applying a species-group nomenclature to the larvae of *Pseudodiamesa* dividing the genus into 2 species-groups that also have distinctive ecological preferences (Makarchenko & Makarchenko, 1999). The first is represented by 2 species, *P. branickii* (Nowicki) and *P. pertinax* (Garret), which are adapted to moderately cold conditions (littoral or non-glacial environments). While *P. branickii* has a wide geographical distribution in the Nearctic, Palearctic and Oriental regions *P. pertinax* is endemic to the Nearctic region (Ilyashuk et al., 2010). The second is the *P. nivosa* group which includes 10 species, their ecology is more difficult to define, but in general they are adapted to colder, peri-glacial conditions and have a preferential distribution in the Palearctic region (Fig. 1); however, in this group there is one species endemic to the Oriental region (*P. nepalensis*) and another one (*P. arctica*) to the Nearctic region (Ilyashuk et al., 2010; Manca et al., 1998). Therefore, for the Nearctic region only 3 species of this genus have been reported and 2 are endemic (Ilyashuk et al., 2010; Oliver, 1959) (Fig. 1): *P. arctica* (of the *P.*

*nivosa* group), and the 2 moderately-cold adapted species of the *P. branickii* group: *P. pertinax* and *P. branickii*.

In this paper we report the presence of chironomid larvae and pupae belonging to the *P. branickii* species-group in recent sediments of lakes El Sol and La Luna, both tropical high-altitude lakes from central Mexico. This is the first report of this species-group in Mexico and represents its southernmost record at a site located in a transitional area between the Nearctic and the Neotropical regions (Morrone, 2014, 2019).

## Materials and methods

The Nevado de Toluca (19°06'30" N, 99°45'30" W) is a stratovolcano located in the Trans-Mexican Volcanic Belt in central Mexico; with 4,680 m asl, it represents the fourth highest peak in the region. The crater of this volcano (4,200 m asl) contains 2 permanent lakes, El Sol and La Luna (Fig. 2). These are shallow (< 15 m) lakes with cold (< 10 °C), slightly acidic (pH < 7), clear waters of low alkalinity and nutrient levels (oligotrophic to ultraoligotrophic). The lakes lie above the local tree line (ca. 4,000 m asl) and have a cold climate with mean annual temperature of 3.8 °C and extreme temperatures on the range of -9 °C to 19 °C (SMN, 2019). Rainfall is concentrated from May to September, with average annual precipitation of 1,213 mm yr<sup>-1</sup>. Despite their high altitude, they do not freeze during winter, and their mixing regime is warm polymictic. Previous research reported the presence of chironomid larvae in the sediments of these lakes (Oseguera et al., 2016), *Pagastia* sp. and *Tanytarsus* sp. were reported for lake El Sol and *Pagastia* sp. was reported for lake La Luna.

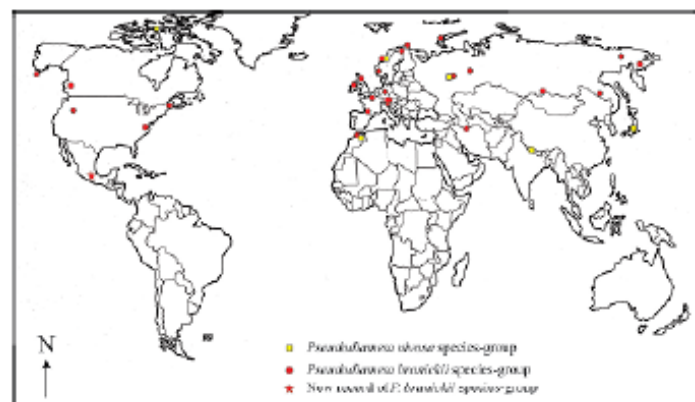


Figure 1. Map showing worldwide distribution of *P. branickii* (circles) and *P. nivosa* (squares) groups.



Sediment samples were collected from littoral and profundal zones in lakes El Sol and La Luna in November 2018 (Fig. 2). Profundal sediment was collected using an Eckman dredge, littoral sediment was collected with plastic jars, in both cases sediment was sieved using 100  $\mu\text{m}$  mesh and inspected for chironomid larva, pupae or exuviae which were hand-picked using tweezers. Surface sediment samples from the profundal zone were also collected in 250 ml plastic jars and preserved with alcohol for further examination in the laboratory. For laboratory rearing, third and fourth instar live larvae were deposited in individual, ventilated jars with some water and sediment and kept in the fridge at 4  $^{\circ}\text{C}$ , 3 of these individuals metamorphosed to pupae in the laboratory.

Chironomid larvae and pupae were slide-mounted using Hydromatrix<sup>®</sup>, identified and photographed under an optical microscope (Olympus BX50 - DP20 camera). For identification of larvae, morphological characteristics of the head capsules such as pecten epipharyngis, labral lamella, mentum and antenna were used (Ilyashuk et al., 2010; Makarchenko & Makarchenko, 1999). Identification of pupal exuviae was based on Serra-Tosio (1976). Specimens were deposited in the National Insect Collection at the Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (CNIN-IB-UNAM). Preserved chironomid larvae specimens collected previously from lakes El Sol and La Luna by Oseguera et al. (2016) were also re-inspected.

## Results

Six larvae and 3 pupae cultivated in the laboratory allowed the identification of *Pseudodiamesa branickii*

species-group (subfamily Diamesinae) in lake La Luna. Re-examination of the material collected previously from both lakes, El Sol and La Luna (Oseguera et al., 2016), allowed confirmation that the larvae reported as *Pagastia* sp. corresponds to the *P. branickii* species-group, which is documented for the first time in central Mexico.

Selected features of the head capsule morphology such as antennal ratio, pecten epipharyngis and mentum are key to separate the different species-groups (Makarchenko & Makarchenko, 1999). In *P. branickii* all the teeth in the mentum are similar in color and the antennal ratio is  $< 2.5$  (Fig. 3). Regarding the labro-epipharyngeal region (Fig. 4), the pecten holds an odd number of median scales with a single median scale and 3 pairs of lateral scales, there is no labral lamella visible. These characteristics separate the larvae of the *P. branickii* species-group from the sister *P. nivosa* species-group and allow identification of the specimens from the Nevado de Toluca lakes as belonging to the *P. branickii* group (Ilyashuk et al., 2010). The larvae in the 2 sister species in this group (*P. branickii* and *P. partinax*) appear to be identical, therefore the separation of both species based on larvae morphology is impossible since the immature stages of *P. partinax* are still unknown (Ilyashuk et al., 2010).

Identification was carried out using pupal exuviae of the reared specimens. In the VII and VIII abdominal segments of *P. branickii*, L the setae are non-branched and in the anal lobe the more external of the 3 anal macrosetae is fragile (often broken) and farthest from the other 2 (Fig. 5). In *P. nivosa*, L the setae of abdominal segments VII and VIII are branched and the anal macrosetae of the anal lobe are similar and equally distant between each other (Serra-Tosio, 1976).

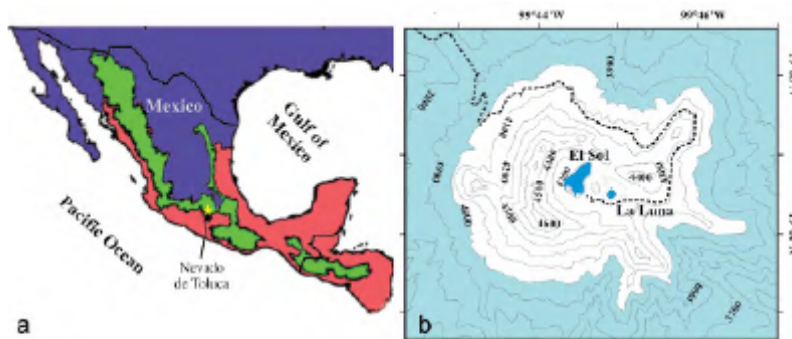


Figure 2. Location maps. a) Location of the Nevado de Toluca, in a transitional area (green) between the Nearctic (purple) and the Neotropical (pink) regions (according to Morrone, 2014, 2019); b) lakes La Luna and El Sol, at 4,200 m asl, in the crater of the Nevado de Toluca Volcano.

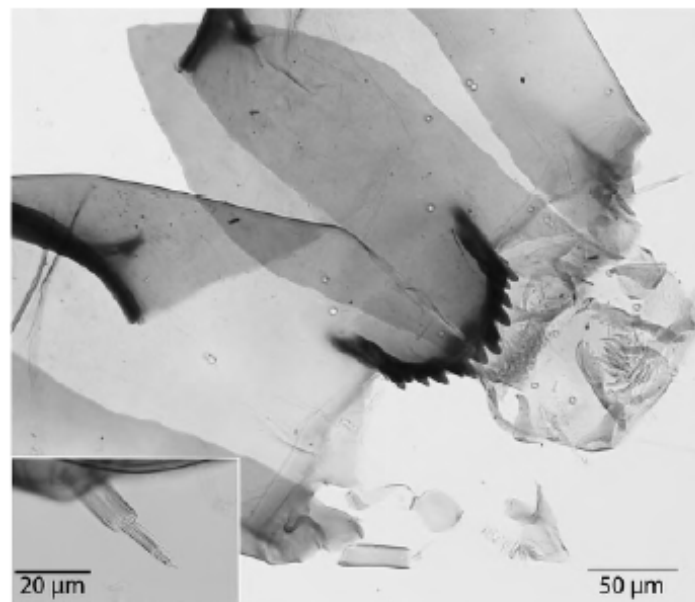


Figure 3. Larval head capsule showing mentum and labro-epipharyngeal complex. Details of the antenna are shown in the left-lower corner

### Discussion

*Pseudodiamasa* species are cold-stenothermic, with an ability to survive at below zero temperatures. This must be an evolutionary conserved guild in the subfamily Diamesinae, which in turn results as a strategy for survival since they spend most of their life as larvae while the pupal and adult stages last only a few days (Lencioni & Bernabò, 2017). The *P. branickii* group is characteristic of moderately cold conditions, in agreement with the climatic characteristics at the Nevado de Toluca lakes, which do not regularly freeze during winter. This species-group is more common in soft sediments of running waters and littoral zones of lakes (Boggero et al., 2006; Rossaro et al., 2006). First and second instars larvae of *P. branickii* are detritus feeders whereas third and fourth instars larvae are predators (Lencioni & Bernabò, 2017).

The *Pseudodiamasa branickii* species-group has a wide geographical distribution in the Northern Hemisphere, but thus far in the Nearctic region it has only been collected in a few localities, such as the Rocky Mountains in British Columbia and Alberta, Alaska and the northern part of the

East coast (Fig. 1, Appendix 1). *Pseudodiamasa branickii* group is part of the circumpolar fauna which suggests earlier land connections between Eurasia and North America. Its presence in central Mexico appears to be related with past climatic fluctuations and the existence of boreo-transitional conditions along the Mexican highlands, as a southward extension of the North American Rocky Mountains (Siciński, 1988). The highest mountains in central Mexico (including the Nevado de Toluca) show evidences of past glacier advances during intervals of colder climatic conditions during which this species-group could have extended its geographical range southwards, into the highlands of central Mexico (Vázquez-Selem & Heine, 2011). Therefore, this group may have remained as relict species by retreating to the favorable conditions on the highest peaks in the Mexican highlands during warmer periods, when mountain glaciers retreated. Indeed, the tolerance of the species to freezing temperatures suggests that populations isolated on different mountain ranges provide insights of historical changes probably associated to glacial periods (DeChaine & Martin, 2006; Knowles, 2000).

This new record of the *P. branickii* group found at the southern boundary of the Nearctic region, more specifically in the Mexican Transition Zone, extends the geographical distribution of the genus *Pseudodiamesa* (Morrone, 2019). In addition, our results provide information about the ecology and biogeographical distribution of the genus

and its potential isolation and further adaptation in a high mountain region in central Mexico. We also give insight on the Diamesinae and its relationships with temperature, which in turn, is a potential tool to evaluate the effect of global warming during the last century. More work is needed, especially dealing with taxonomical aspects of the adults, which in turn are key elements to species identification. On the other hand, molecular studies of different populations within the *P. branickii* species-group could be required to overcome the difficulties for the collection of adults and the taxonomic problems when dealing with immature stages of this group and may also provide valuable information on the history and biogeographical affinities of its population in central Mexico.

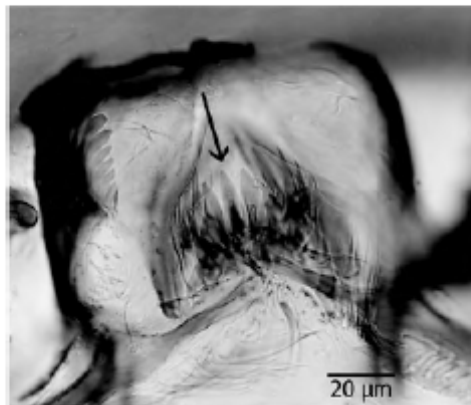


Figure 4. Details of the labro-epipharyngeal region. The arrow shows the single median scale.

#### Acknowledgments

This research was funded by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Mexico) and the Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Mexico) grant Conacyt-Semarnat 262970 and by UNAM-PAPIIT-IN100717. We thank Eugenyi Makarchenko and Boris Ilyashuk for their valuable comments during the preparation of this work. We also acknowledge the facilities provided by the Parque Nacional Nevado de Nevado de Toluca, Conap during fieldwork.

#### References

- Boggero, A., Füreder, L., Lencioni, V., Simcic, T., Thaler, B., Ferrarese, U. et al. (2006). Littoral chironomid communities of Alpine lakes in relation to environmental factors. *Hydrobiologia*, 562, 145–165. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1809-6>
- DeChaine, E. G., & Martin, A. P. (2006). Using coalescent simulations to test the impact of Quaternary climate cycles on divergence in an alpine plant-insect association. *Evolution*, 60, 1004–1013. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2006.tb01178.x>
- Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Makarchenko, E. A., & Heiri, O. (2010). Midges of the genus *Pseudodiamesa* Goetghebuer (Diptera, Chironomidae): current knowledge and palaeoecological perspective. *Journal of Paleolimnology*, 44, 667–676. <https://doi.org/10.1007/s10933-010-9446-0>
- Knowles, L. L. (2000). Tests of Pleistocene speciation in montane grasshoppers (genus *Melanoplus*) from the sky islands of western North America. *Evolution*, 54, 1337–1348. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2000.tb00566.x>
- Lencioni, V., & Bernabò, P. (2017). Thermal survival limits of young and mature larvae of a cold stenothermal chironomid from the Alps (Diamesinae: *Pseudodiamesa branickii* [Nowicki, 1873]). *Insect Science*, 24, 314–324. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12278>

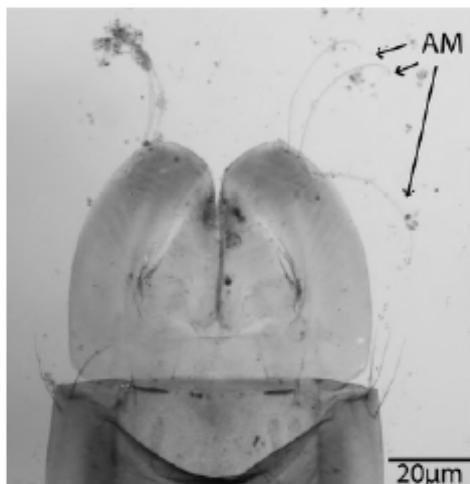


Figure 5. Abdominal tergite VII and anal lobe of pupae. AM: anal macrosetae.

- Makarchenko, E., & Makarchenko, M. (1999). Chironomidae. Non-biting midges. In S. J. Tsalolikhin (Ed.), *Key to freshwater invertebrates of Russia and adjacent lands. Higher insects: Diptera. Vol. 4* (pp. 210–295). St. Petersburg: Zoological Institute.
- Manca, M., Ruggiu, D., Panzani, P., Asioli, A., Mura, G., & Nocentini, A. M. (1998). Report on a collection of aquatic organisms from high mountain lakes in the Khumbu Valley (Nepalese Himalayas). *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, 57, 77–98.
- Morrone, J. J. (2014). Biogeographical regionalisation of the Neotropical region. *Zootaxa*, 3782, 1–110.
- Morrone, J. J. (2019). Regionalización biogeográfica y evolución biótica de México: encrucijada de la biodiversidad del Nuevo Mundo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e903980. <https://doi.org/10.22201/1b.20078706e.2019.90.2980>
- Oliver, D. (1959). Some Diamesini (Chironomidae) from the Nearctic and Palaearctic. *Entomologisk Tidskrift*, 80, 48–64.
- Oseguera, L. A., Alcocer, J., & Escobar, E. (2016). Macroinvertebrados bentónicos de dos lagos tropicales de alta montaña en el volcán Nevado de Toluca, en la región central de México. *Hidrobiologica*, 26, 419–432. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcb/hidro/2016v26n3/Oseguera>.
- Rossaro, B., Lencioni, V., Boggero, A., & Marziali, L. (2006). Chironomids from Southern Alpine running waters: ecology, biogeography. *Hydrobiologia*, 562, 231–246. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1813-x>
- Serra-Tosio, B. (1976). Chironomides des Alpes: Le genre *Pseudodiamesa* (Diptera, Chironomidae). *Travaux Scientifiques du Parc National Vanoise*, 7, 117–138.
- Siciński, J. (1988). New data on the rare species *Pseudodiamesa nivosa* (Goetghebuer) (Diptera, Chironomidae). *Aquatic Insects*, 10, 73–76. <https://doi.org/10.1080/01650428809361315>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2019). *Normales climatológicas*. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/emas/>
- Vázquez-Selem, L., & Heine, K. (2011). Late Quaternary glaciation in Mexico. In J. Ehlers, J. Ehlers, P. L. Gibbard, & P. D. Hughes (Eds.), *Quaternary glaciations: extent and chronology: a closer look. Vol. 15* (pp. 849–861). Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00061-1>