

UNIVERSIDAD DE SONORA  
División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

RECONSTRUCCIÓN PALEOECOLÓGICA  
DE LA CIÉNEGA TONIBABI  
(SONORA, MÉXICO) DURANTE LOS  
ÚLTIMOS 1,300 AÑOS, A PARTIR DEL  
ANÁLISIS DE DIATOMEAS

Tesis Profesional  
Que para obtener el título de Geólogo

Presenta:

Lawrence Ramos Hurtado

Hermosillo, Sonora. Marzo de 2022



# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



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

Hermosillo, Sonora, 28 de octubre de 2021

**DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA**  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA  
UNIVERSIDAD DE SONORA  
Presente.-

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente el tema de Tesis, intitulado:

**“Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México)  
durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas”**

Esto es con el fin de que el alumno **Lawrence Ramos Hurtado** con Expediente No. **215203689**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología.

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedamos de Usted.

**A T E N T A M E N T E**  
**“EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA”**

Ivan Espinoza  
**M.C. Iván Rosario Espinoza Encinas**  
DIRECTOR DE TESIS

C.c.p. Interesado.  
C.c.p. Archivo.





"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología  
División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora, México a 16 de noviembre de 2021

**MC IVÁN ROSARIO ESPINOZA ENCINAS**  
**DIRECTOR DE TESIS**  
**P R E S E N T E.-**

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de Tesis propuesto por usted intitulado:

**"RECONSTRUCCIÓN PALEOECOLÓGICA DE LA CIÉNEGA TONIBABI (SONORA, MÉXICO) DURANTE LOS ÚLTIMOS 1,300 AÑOS, A PARTIR DEL ANÁLISIS DE DIATOMEAS"**

Lo anterior con el fin de que el alumno **Lawrence Ramos Hurtado**, con No. de Expediente **215203689**, pueda presentar su examen profesional para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Presidente	Dr. Francisco Javier Cuen Romero
Secretario	MC María Margarita de la O Villanueva
Vocal	MC Iván Rosario Espinoza Encinas

Sin otro particular y agradeciendo de antemano su atención a la presente, quedo de usted

**A T E N T A M E N T E**  
**"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"**

**DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**



El saber de mis hijos  
hará mi Grandeza  
**DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGÍA**

c.c.p. archivo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología  
División de Ciencias Exactas y Naturales

## NOMBRE DE LA TESIS:

**"RECONSTRUCCIÓN PALEOECOLÓGICA DE LA CIÉNEGA TONIBABI  
(SONORA, MÉXICO) DURANTE LOS ÚLTIMOS 1,300 AÑOS,  
A PARTIR DEL ANÁLISIS DE DIATOMEAS"**

## NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

**LAWRENCE RAMOS HURTADO**

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

  
**DR. FRANCISCO JAVIER CUEN ROMERO**

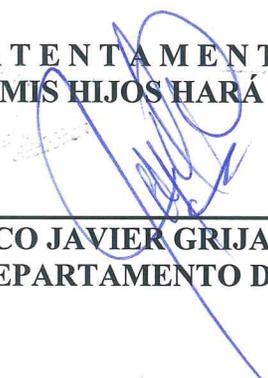
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis profesional y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de licenciatura en la Universidad de Sonora.

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

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

  
**M.C. IVÁN ROSARIO ESPINOZA ENCINAS**

**A T E N T A M E N T E**  
**"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"**

  
**DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**



El saber de mis hijos  
hará mi grandeza  
**LICENCIATURA  
EN GEOLOGIA**

c.c.p. Archivo.

Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México) durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas.

---

## **DEDICATORIA**

A mis padres Yolanda Hurtado y Laurence Ramos,

a mis hermanos Francisco, Michel y Luis,

Este trabajo es por ustedes, sin sus sacrificios, yo no estaría aquí.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al personal docente y administrativo del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora por ser partícipe y contribuir con su preparación a mi formación de Geólogo.

A mi director de tesis, M. C. Iván Espinoza, por haberme orientado en este proyecto.

A la M. C. Margarita de la O y al Dr. Francisco Cuen por sus observaciones realizadas en la revisión de mi trabajo de tesis.

A La Dra. Cristina Peñalba por la oportunidad de trabajar en el Laboratorio de Recursos Naturales Terrestres durante la realización de mi tesis.

A mis padres, Laurence Ramos y Yolanda Hurtado que, sin su apoyo y ayuda desinteresada, yo no estaría aquí donde me encuentro ahora. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Orgulloso de que sean mis padres y que estén junto a mí en este momento tan importante. Gracias por ser quienes son y por creer en mí.

A mis amigos, Gustavo Dessens, Israel Soria, Valeria Ortega, Martha Monteverde, e Iván Vázquez, hoy que concluyo un capítulo más de mi historia, les agradezco por su apoyo y constancia, por compartir horas de estudio y por los buenos momentos en mi vida universitaria.

## CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
RESUMEN .....	x
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Objetivos .....	3
II. ÁREA DE ESTUDIO.....	4
2.1 Localización .....	4
2.2 Geología regional.....	5
2.3 Clima y vegetación.....	8
2.4 Hidrología.....	10
III. ANTECEDENTES .....	11
3.1 El Holoceno, su variabilidad climática y métodos de estudio .....	11
3.2 Las diatomeas como método de reconstrucción ambiental .....	13
3.3 Registros paleoambientales de la Ciénega Tonibabi.....	17
3.3.1 Estudios polínicos en los sedimentos de la Ciénega Tonibabi.....	17
3.3.2 Estudios de diatomeas en los sedimentos de la Ciénega Tonibabi .....	18
3.3.3 Estudios realizados en los sedimentos del núcleo TB2.....	20
IV. METODOLOGÍA .....	23
4.1 Muestreo del núcleo.....	23
4.2 Limpieza de sedimentos .....	23
4.3 Montaje de las láminas .....	25
4.4 Identificación y conteo .....	25
4.5 Construcción del diagrama de diatomeas.....	26
4.6 Análisis estadísticos.....	27
4.7 Estimación del pH .....	28
V. RESULTADOS.....	29
5.1 Diagrama de diatomeas .....	31
5.1.1 Zona 1.....	34
5.1.2 Zona 2.....	34

Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México) durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas

---

5.1.3 Zona 3.....	35
5.1.4 Zona 4.....	36
5.1.5 Zona 5.....	37
5.2 Variación en el pH.....	38
5.3 Análisis de componentes principales.....	39
VI. DISCUSIÓN.....	41
6.1 Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi.....	41
6.2 Reconstrucción paleoclimática en la región centro de Sonora.....	44
6.2.1 Entre 1,310 y 1,050 años cal. AP.....	46
6.2.2 Anomalía Climática del Medievo.....	46
6.2.3 Pequeña Edad de Hielo.....	47
VII. CONCLUSIONES.....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
APÉNDICE I. Listado taxonómico.....	60
APÉNDICE II. Láminas de diatomeas fósiles.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Ciénega Tonibabi. ....	4
Figura 2. Mapa geológico del área de estudio. ....	6
Figura 3. Vegetación nativa del área de estudio. ....	9
Figura 4. División del periodo Cuaternario (Modificado de Bardají, 2018). ....	12
Figura 5. Representación simplificada de la frústula. ....	13
Figura 6. Clasificación de diatomeas (Modificado de Crosta y Koç, 2007). ....	14
Figura 7. Núcleo TB2. ....	20
Figura 8. Litología del núcleo TB2 (Modificado de Galaz-Samaniego, 2017). ....	22
Figura 9. Diagrama de diatomeas. ....	32
Figura 10. Cambios en el pH de la Ciénega de Tonibabi, Sonora. ....	38
Figura 11. Análisis de componentes principales. ....	40
Figura 12. Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega de Tonibabi. ....	42
Figura 13. Curva de isótopos de oxígeno del núcleo de hielo GISP2, Groenlandia. .....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diatomeas preservadas en los sedimentos de la Ciénega Tonibabi. ....	19
Tabla 2. Muestras seleccionadas para el análisis de diatomeas. ....	24
Tabla 3. Listado de diatomeas identificadas en el núcleo TB2 y su clasificación ecológica (Van Dam <i>et al.</i> , 1994). ....	29

## RESUMEN

En el presente estudio se lleva a cabo una reconstrucción paleoecológica de los últimos 1,300 años de la Ciénega Tonibabi, en el municipio de Moctezuma, en la región centro del estado de Sonora, a través de la identificación y el análisis del conjunto de diatomeas preservadas en los sedimentos del núcleo TB2. Los resultados del análisis incluyen la identificación de 50 taxones de diatomeas, siendo *Denticula elegans* la especie más abundante. La interpretación de las asociaciones de diatomeas preservadas en los sedimentos permitió la reconstrucción de parámetros fisicoquímicos de las aguas de la ciénega, como la profundidad, la salinidad y el pH, parámetros que permitieron caracterizar una fase seca dominante en la mayor parte del tiempo estudiado, que incluye el periodo climático denominado Anomalía Climática del Medievo; durante esta fase seca dominan las especies bentónicas y se presenta un registro importante de especies con afinidad a aguas salobres. Dos fases húmedas fueron identificadas en las muestras más recientes del estudio, relacionadas con el periodo climático conocido como la Pequeña Edad de Hielo, en estas fases de mayor humedad se registran un ligero aumento de especies ticolanctónicas y el dominio de especies de agua dulce. Estas interpretaciones y su correlación con otros trabajos desarrollados en el sitio permiten comprender la dinámica de las comunidades de diatomeas de la Ciénega Tonibabi en el pasado reciente, así como reconstruir los cambios ecológicos locales y aquellos cambios climáticos regionales que determinaron su composición.

## I. INTRODUCCIÓN

La paleoecología es un área de la paleontología que se encarga de estudiar las complejas relaciones que existieron entre los organismos del pasado geológico y los ambientes donde se desarrollaron (Camacho y Longobucco, 2008). La reconstrucción de las formas de vida pasadas y su relación con su entorno se basan tanto en la información tafonómica, como en la comparación de ejemplos actuales (Krassilov, 2003), deduciendo que los parámetros que afectan la distribución y abundancia de las poblaciones actuales influyeron de igual manera en el pasado y, por lo tanto, el uso de la información ecológica actual es de suma importancia para la interpretación de los estudios paleoecológicos (Lowe y Walker, 2015).

Una de las herramientas más utilizadas en la reconstrucción de cambios ambientales en los ecosistemas acuáticos continentales, son las diatomeas (Stoermer y Smol, 1999; Battarbee *et al.*, 2001), algas microscópicas que presentan un esqueleto de sílice amorfo denominado frústula (Saraswati y Srinivasan, 2016). El gran éxito de las diatomeas se debe a la rápida y sensible respuesta que ofrecen a los cambios físicos, químicos y biológicos producidos en su entorno (López-Fuerte y Siqueiros-Beltrones, 2011). Sin embargo, la interpretación adecuada de la información que proporcionan las diatomeas debe ser aplicada de manera conjunta con otras metodologías, como la estratigrafía, el fechamiento de los sedimentos o el análisis de otros grupos microfósiles (Caballero *et al.*, 2013).

El presente estudio consiste en la reconstrucción de las condiciones paleoecológicas de la Ciénega Tonibabi, durante el periodo comprendido entre 1,310 y 270 años antes del presente (AP), reconstrucción basada en el registro de diatomeas de un núcleo de sedimentos extraído de la ciénega. Los resultados obtenidos del análisis son contrastados con estudios similares realizados previamente en la Ciénega Tonibabi.

### **1.1 Justificación**

La Ciénega Tonibabi se conserva húmeda durante todo el año, debido al suministro de agua por parte del manantial también llamado Tonibabi. Esta característica del sitio favorece la preservación de las frústulas de diatomeas en los sedimentos, haciendo posible el desarrollo de estudios paleoecológicos basados en las asociaciones de diatomeas.

Los estudios polínicos del sitio (Espinoza-Encinas, 2012; Galaz-Samaniego, 2017, 2019) han permitido evaluar los cambios de la vegetación en sus alrededores, asociados a cambios climáticos durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. Los estudios basados en el registro de diatomeas (Espinoza-Encinas, 2012; Trinidad-Camarena, 2019) han contribuido al conocimiento de los cambios ambientales en la región centro de Sonora, durante la transición del Norgripiano al Megalayiano, segunda y tercera edad del Holoceno. Sin embargo, los registros paleoambientales más recientes para la Ciénega Tonibabi son escasos.

Este trabajo permitirá conocer los cambios en las asociaciones pasadas de diatomeas de la Ciénega Tonibabi y, a través de sus características ecológicas, estimar algunos parámetros fisicoquímicos del sitio, con los cuales es posible reconstruir cambios ambientales ocurridos en la historia reciente de la ciénega, correlacionar los resultados con otros trabajos similares y asociarlos a eventos climáticos regionales o globales.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo general del presente estudio es describir los cambios paleoecológicos ocurridos al final del Holoceno en la Ciénega Tonibabi, a través del registro de diatomeas preservadas en los sedimentos de la ciénega.

Los objetivos específicos de este estudio son:

1. Identificar las diatomeas preservadas en los sedimentos al mínimo nivel taxonómico posible.
2. Interpretar las características paleoecológicas de las asociaciones de diatomeas registradas en los sedimentos.
3. Estimar los cambios en pH, salinidad y nivel del agua de la ciénega, durante el tiempo estudiado.
4. Comparar los resultados obtenidos con trabajos realizados anteriormente en el mismo sitio.

## II. ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 Localización

La Ciénega Tonibabi se encuentra al sur de la Sierra La Madera, en el municipio de Moctezuma, Sonora (Figura 1), en las coordenadas geográficas 29° 50' 16" latitud norte y 109° 33' 45" longitud oeste, a una altura de 780 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Espinoza-Encinas, 2012). El acceso al sitio de estudio, partiendo de la ciudad de Hermosillo, es por la carretera federal No. 14 Hermosillo – Moctezuma, al arribar a esta última población, se continúa por la carretera estatal No. 31 Moctezuma – Huásabas, hasta el kilómetro 14, donde se conecta con un camino de terracería que lleva al Rancho Tonibabi, al cual pertenece la ciénega.

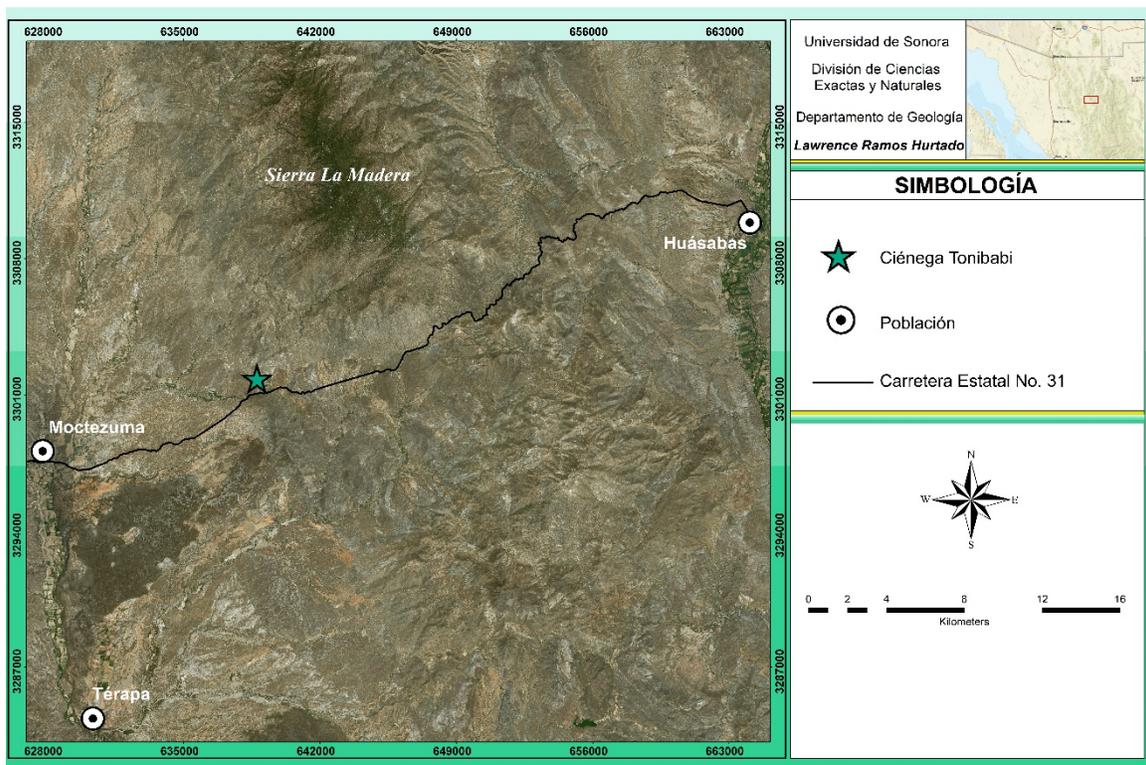


Figura 1. Localización de la Ciénega Tonibabi.

## 2.2 Geología regional

La Sierra La Madera se localiza dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental (SMO), en la subprovincia de Sierras y Valles Paralelos, caracterizada por una serie de montañas y valles alineados en dirección NW-SE, delimitados por fallas normales (Roldán-Quintana, 1994). La litología de la región está representada por rocas sedimentarias y rocas ígneas volcánicas e intrusivas (Figura 2), con edades que van desde el Cretácico Temprano hasta el Cuaternario (Servicio Geológico Mexicano, 2013; Paz-Moreno *et al.*, 2003).

El Cretácico Inferior está constituido por una secuencia de caliza intercalada con lutita, correlacionable con rocas de la región de Lampazos (Roldán-Quintana, 1994) y con el Grupo Bisbee del sur de Arizona (Servicio Geológico Mexicano, 2013). Esta unidad se encuentra expuesta al sur de la Sierra La Madera.

Durante el Cretácico Superior al Eoceno, se depositó en la región una secuencia constituida principalmente por derrames y tobas de composición andesítica (Roldán-Quintana, 1994), correspondientes a la Formación Tarahumara, que a su vez forma parte del Complejo Volcánico Inferior de la SMO (Servicio Geológico Mexicano, 1999). En la región, esta secuencia se divide en dos unidades, andesita-traquita al sureste de la Sierra La Madera, y andesita-toba andesítica aflorando al este y sureste.

Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México) durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas

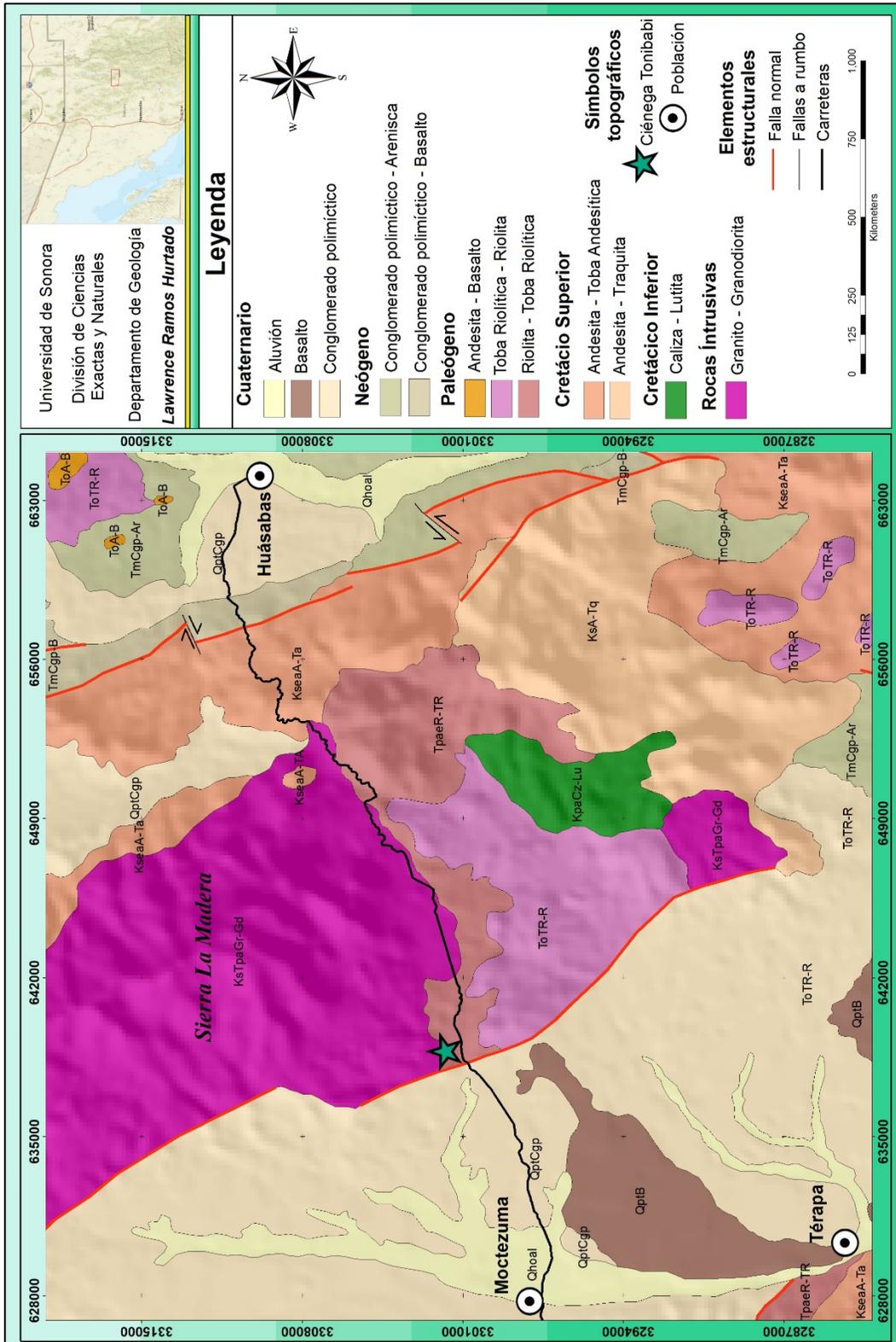


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio (modificado de la Carta Geológica-Minera: La Madera H12-9, Servicio Geológico Mexicano, 2013).

Del Cretácico Superior al Paleoceno las rocas preexistentes fueron afectadas por cuerpos intrusivos granítico-granodioríticos (Servicio Geológico Mexicano, 2013). La Sierra La Madera, expuesta en su mayor parte al norte y noreste de la Ciénega Tonibabi, corresponde a un cuerpo batolítico de esta composición (Roldán-Quintana, 1994; Paz-Moreno *et al.*, 2003).

El Paleógeno se encuentra también representado por rocas del Complejo Volcánico Superior de la SMO (Paz-Moreno *et al.*, 2003). Al sur de la Sierra La Madera se localizan las unidades riolita-toba riolítica del Paleoceno-Eoceno y toba riolítica-riolita del Oligoceno, ésta última junto con la unidad andesita-basalto, también del Oligoceno, se encuentran en pequeños afloramientos dispersos por la región (Servicio Geológico Mexicano, 2013).

Durante el Neógeno, en la región se depositaron rocas sedimentarias formadas por conglomerado polimíctico intercalado por arenisca y basalto del Mioceno, correspondientes a la Formación Báucarit (Servicio Geológico Mexicano, 2013), que afloran principalmente al este y sureste de la Sierra La Madera.

Depósitos continentales cuaternarios, conformados por conglomerados polimícticos, se hospedan en las estribaciones y las planicies al pie de las serranías (Servicio Geológico Mexicano, 2013).

Posteriormente, entre 1.7 y 0.3 millones de años, durante un episodio volcánico de carácter fisural, correspondiente al Campo Volcánico Cuaternario de Moctezuma (Paz-Moreno *et al.*, 2003), los depósitos plio-cuaternarios localizados al suroeste de la Sierra La Madera, fueron cubiertos por basalto.

Finalmente, depósitos del Holoceno formados por material aluvial compuestos por grava, arena y limo se localizan en el curso de las principales corrientes fluviales de la región (Servicio Geológico Mexicano, 2013).

### **2.3 Clima y vegetación**

El área de estudio presenta un clima semiseco semicálido (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009), con una temperatura media anual de 21.7°C, una temperatura máxima de 43.6°C durante el mes de junio y una temperatura mínima de 1.9°C durante el mes de diciembre (Servicio Meteorológico Nacional, 2021). La precipitación anual es cercana a 560 mm, siendo los meses de julio y agosto los que presentan la mayor precipitación, según la información de la estación climatológica más cercana, 26251 Térapa (Servicio Meteorológico Nacional, 2021), localizada al sur de la población de Moctezuma, Sonora (Figura 1), en las coordenadas geográficas 29° 40' 54" latitud norte y 109° 39' 10" longitud oeste, a una altura de 605 msnm.

La vegetación en el área está representada por una gran variedad de especies del matorral espinoso de piedemonte (Figura 3), entre las que se encuentran: *Bursera fagaroides*, *B. laxiflora*, *Cordia sonorae*, *Fouquieria macdougalii*, *Haematoxylum brasiletto*, *Ipomoea arborescens*, *Jatropha cordata*, *Lysilona divaricatum*, *Mimosa distachya* y *Stenocercus thurberi* (Martínez–Yrizar *et al.*, 2010). El matorral espino de piedemonte es un ecosistema transicional entre el Desierto Sonorense y el bosque tropical caducifolio (Búrquez *et al.*, 1999), aunque localmente cambia hacia el bosque templado de pino-encino localizado en la cima de la Sierra La Madera (González-Elizondo *et al.*, 2012). En los alrededores de la ciénega, en las zonas húmedas, destaca la presencia de especies como: *Acacia occidentalis*, *Baccaris salicifolia*, *Prosopis velutina* y *Salix gooddingii* (Valenzuela-Yáñez *et al.*, 2013).



Figura 3. Vegetación nativa del área de estudio.

## 2.4 Hidrología

La Ciénega Tonibabi se encuentra dentro de la subcuenca del Río Moctezuma (cuenca del Río Yaqui), la cual presenta una superficie de 6,712.09 km<sup>2</sup> (Ramírez-García *et al.*, 2015). Al norte de la ciénega, justo al pie de la Sierra La Madera, se localiza un manantial de aguas termales (Valenzuela-Yáñez *et al.*, 2013), que abastece de humedad a la ciénega durante todo el año. Éste es uno de tres manantiales observados en el Rancho Tonibabi (Espinoza-Encinas, 2012), pero el único en el cuál la pendiente del terreno permitió el desarrollo de una ciénega y la acumulación de sedimentos.

El manantial de la Ciénega Tonibabi presenta una temperatura de  $49.8 \pm 1.0$  °C, un pH de  $7.2 \pm 0.1$ , una conductividad eléctrica de  $1400 \pm 44$  µS/cm y  $1202 \pm 36$  ppm de sólidos totales disueltos, siendo clasificado como un manantial de aguas sulfatadas-sódicas (Almirudis *et al.*, 2018). En los bordes de la ciénega y en los arroyos cercanos se han identificado depósitos evaporíticos de thenardita (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y halita (NaCl) (Espinoza-Encinas, 2012), mientras que en los sedimentos antiguos se ha observado el desarrollo de cristales de calcita (CaCO<sub>3</sub>), fluorita (CaF<sub>2</sub>) y yeso (CaSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) (Galaz-Samaniego, 2019).

El agua drenada de la ciénega fluye en dirección norte-sur hacia el Arroyo Agua Caliente, afluente del Arroyo Tonibabi, el cual desciende casi paralelamente a la carretera estatal No. 31, hacia el Valle del Río Moctezuma.

### III. ANTECEDENTES

#### 3.1 El Holoceno, su variabilidad climática y métodos de estudio

Al finalizar el último periodo glacial (conocido como *Würm* en Europa y Asia, *Wisconsin* en América), da inicio el Holoceno, la época más reciente del Cuaternario (Lowe y Walker, 2015). El Holoceno comprende el intervalo de tiempo desde 11,700 años hasta la actualidad (Cohen *et al.*, 2013), cuyo nombre fue usado por primera vez por Paul Gervais (1867). Probablemente esta época es la más estudiada, desde distintos puntos de vista y disciplinas científicas, debido a la gran cantidad de evidencias arqueológicas, bióticas, climáticas, geológicas y geomorfológicas preservadas, las cuales sirven como herramientas para clarificar los fenómenos terrestres y marinos en la actualidad (Walker *et al.*, 2008).

La Sección Estratotipo y Punto de Limite Global (GSSP) para la base del Holoceno se encuentra en un núcleo de hielo de Groenlandia, donde se obtiene un registro climático indirecto a través del límite del Pleistoceno-Holoceno, registrando los primeros signos de calentamiento climático (Bardají, 2018).

El Holoceno se encuentra subdividido en tres edades: Groelandiano, Norgripiano y Megalayiano, como se muestra en la figura 4, las cuales fueron ratificadas juntos con sus correspondientes GSPP por Walker *et al.* (2018).

El Groenlandiano, la base del Holoceno (Walker *et al.*, 2018), está referenciado sobre el núcleo de hielo NGRIP2, datado en 11,700 años, el cual presenta los primeros signos de calentamiento climático tras finalizar el *Younger Dryas* (Bardají, 2018), el último enfriamiento registrado durante el Pleistoceno.

El Norgripiano, está referido sobre el sondeo NGRIP1, datado en 8,236 años, el cual coincide con un enfriamiento brusco, el cual interrumpe el progresivo incremento de temperaturas durante el Groenlandiano (Walker *et al.*, 2018).

El Megalayiano, que debe su nombre el estado de Meghalaya (noreste de India), donde se encuentra la Cueva Mawmluh, sitio donde se estudió el espeleotema KM-A, el cual se ha definido como el GSSP de la edad más reciente del Holoceno, cuyo registro abarca los últimos 4,250 años (Walker *et al.*, 2018).

Eonotema / Eón	Eratema / Era	Sistema / Periodo	Serie / Época	Piso / Edad	GSSP	
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	S	Megalayiano	presente
				M	Norgripiano	4.250 ka
				I	Groenlandiano	8.236 ka
			Pleistoceno	S	<i>Superior</i>	11.7 ka
				M	Chibaniano	129 ka
				I	Calabriano	774 ka
					Gelasiano	1.8 ma

Figura 4. División del periodo Cuaternario (Modificado de Bardají, 2018).

### 3.2 Las diatomeas como método de reconstrucción ambiental

Las diatomeas son algas unicelulares microscópicas fotosintéticas, constituyen casi el 45% de la productividad primaria en los océanos (Field *et al.*, 1998). Cuentan con una pared celular ornamentada compuesta por sílice amorfo (ópalo) llamada frústula (Figura 5), la cual puede variar su longitud entre 5  $\mu\text{m}$  y 2 mm (Round *et al.*, 1990). La frústula consta de dos valvas (también llamadas tecas) que difieren ligeramente de tamaño, la epivalva (o epiteca) y la hipovalva (o hipoteca), la primera, más grande, se ajusta sobre la más pequeña para encerrar la célula viva, estas valvas se encuentran unidas por una serie de bandas que en conjunto son llamadas cíngulo (Tobón-Velázquez, 2015).

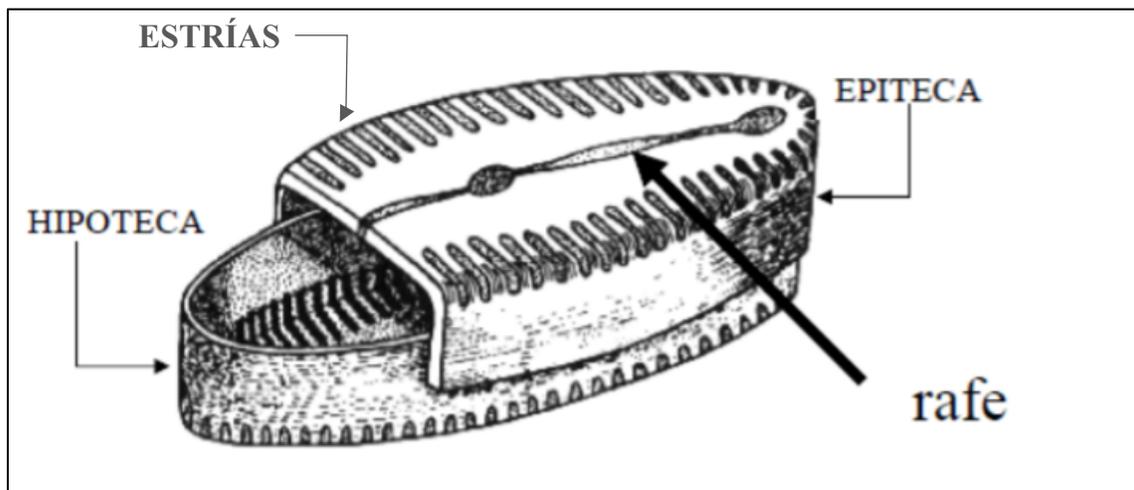


Figura 5. Representación simplificada de la frústula (Modificado de Brasier, 1980).

Las diatomeas pertenecen a la División Bacillariophyta (Figura 6), la cual se divide en tres clases: Coscinodiscophyceae (diatomeas de simetría radial), Fragilariophyceae (diatomeas de simetría axial, sin rafe) y Bacillariophyceae (diatomeas de simetría axial, con rafe) (Round *et al.*, 1990; Jain, 2000; Williams, 2020).

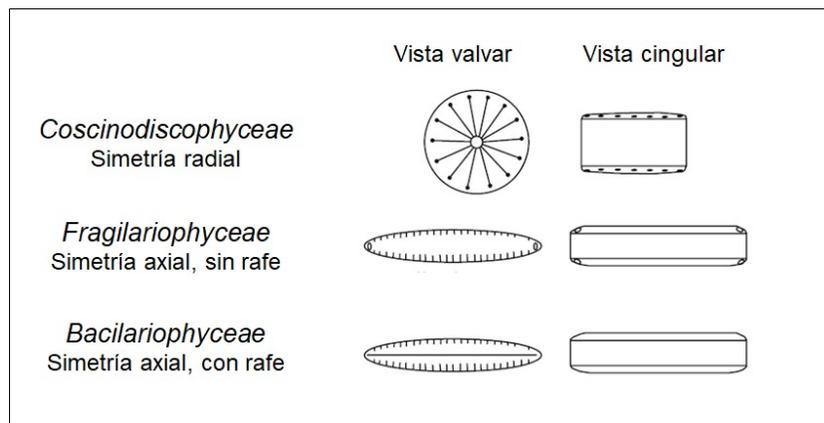


Figura 6. Clasificación de diatomeas (Modificado de Crosta y Koç, 2007).

Se reproducen de manera asexual, por división celular; esto implica que las dos valvas se separen para formar un nuevo individuo. Cada célula hija forma una nueva hipovalva, involucrando una reducción sucesiva de tamaño en una de las células hijas en cada división (Hasle y Syvertsen 1997, Barsanti y Gualtieri, 2010).

Las diatomeas se distribuyen por una gran variedad de ambientes acuáticos y subacuáticos, la Clase Coscinodiscophyceae (conocidas anteriormente como diatomeas centrales) proliferan en el plancton de ambientes marinos, mientras que las clases Fragilariophyceae y Bacillariophyceae (ambas reconocidas anteriormente

como diatomeas pennadas) predominan en los ambientes de agua dulce, suelos húmedos y los hábitats marinos bentónicos (Armstrong y Brasier, 2004).

La ornamentación de las valvas permite diferenciar a la extensa diversidad de especies que posee cada género, debido a que estas son muy específicas en cuanto a las condiciones que favorecen a su hábitat, como la forma de vida, la salinidad, el nivel de pH y la humedad presente en el medio (Duhalde, 2020); siendo de gran importancia paleoecológica al conservarse como fósiles, esto permite emplearlas como bioindicadores, asociándolas a las secuencias estratigráficas, tanto en ambientes continentales como costeros, para evaluar las condiciones ambientales del pasado (Battarbee, 1986; Smol y Stoermer, 2010).

Uno de los indicadores de la distribución de las diatomeas es la salinidad. El sistema hialino de clasificación, introducido por Kolbe (1927) y modificado por Hustedt (1957), presenta cuatro grupos: *euhalobias* (sobreviven en concentraciones mayores a 30%), *mesohalobias* (sobreviven en concentraciones de 0.2 a 30%), *oligohalobias* (sobreviven en concentraciones menores a 0.2%) y *halófobas* (no pueden tolerar aguas ligeramente saladas).

La distribución y abundancia de muchas especies de diatomeas también varía respecto al pH del agua (Battarbee y Charles, 1987; Smol, 1990), siendo divididas en cinco grupos de acuerdo con su preferencia al pH: *alcalibiónticas* (habitan aguas con valores en pH mayores a 7), *alcalófilas* (habitan aguas con pH cercanos a 7,

pero preferentemente mayores a 7), *circumneutrales* (habitan aguas con pH cercano a 7), *acidófilas* (habitan en aguas con pH cercanos a 7, pero preferentemente menores a 7), *acidobióticas* (habitan aguas con pH menores a 7, con distribución óptima debajo de 5.5) e *indiferentes* (no presentan una preferencia aparente hacia algún valor de pH).

Van Dam *et al.* (1994) formuló una clasificación en relación con la humedad en su ambiente: *tipo I* (nunca, o solo muy raras veces, ocurren fuera de cuerpos de agua), *tipo II* (ocurren principalmente en cuerpos de agua, algunas veces en sitios húmedos), *tipo III* (ocurren principalmente en cuerpos de agua, también son regulares en sitios húmedos), *tipo IV* (ocurren principalmente en sitios húmedos o temporalmente secos) y *tipo V* (ocurren, casi exclusivamente, fuera de cuerpos de agua).

### **3.3 Registros paleoambientales de la Ciénega Tonibabi**

En la Ciénega Tonibabi se han desarrollado reconstrucciones paleoclimáticas y paleoambientales basadas principalmente en el estudio de polen y diatomeas preservados en los sedimentos (Espinoza-Encinas, 2012; Galaz-Samaniego, 2017, 2019; Trinidad-Camarena, 2019).

#### **3.3.1 Estudios polínicos en los sedimentos de la Ciénega Tonibabi**

Los registros polínicos más antiguos de la ciénega datan del final del Pleistoceno, hace aproximadamente 15,000 años calibrados antes del presente (cal. AP), cuando la ciénega presentaba un clima más frío que el actual y un régimen de lluvia dominante en invierno, mientras que la vegetación cercana variaba entre el bosque de pino y el bosque de pino-encino (Galaz-Samaniego, 2019).

Durante el Holoceno, últimos 11,700 años cal. A.P., los registros de la ciénega indican un aumento gradual en la temperatura y un predominio de las condiciones áridas (Galaz-Samaniego, 2019), las cuales favorecieron el establecimiento del matorral de pie de monte en la región, hace aproximadamente 5,000 años cal. A.P. (Espinoza-Encinas, 2012; Galaz-Samaniego, 2019). Sin embargo, hace aproximadamente 2,000 años cal. A.P., se registran nuevamente condiciones más frías y húmedas que las actuales, observándose un aumento en los granos de polen de especies templadas (Espinoza-Encinas, 2012).

Los registros polínicos más recientes indican condiciones similares a las actuales, con un clima cálido y condiciones áridas, donde dominan las lluvias de verano (Espinoza-Encinas, 2012, Galaz-Samaniego, 2017).

### **3.3.2 Estudios de diatomeas en los sedimentos de la Ciénega Tonibabi**

Los registros de diatomeas han contribuido a la reconstrucción cualitativa de algunos parámetros hidrológicos de la ciénega Tonibabi, principalmente la salinidad y el pH (Espinoza-Encinas, 2012; Trinidad-Camarena, 2019). Las asociaciones de diatomeas preservadas en los sedimentos (Tabla 1), dominadas por *Denticula elegans*, *Epithemia adnata* y *Epithemia gibberula*, indican que la salinidad de la ciénega ha variado en repetidas ocasiones de condiciones oligohalobias a mesohalobias, durante aproximadamente el periodo comprendido entre 6,000 y 1,000 años cal. A.P., tiempo durante el cual ha permanecido con un pH alcalino (Espinoza-Encinas, 2012; Trinidad-Camarena, 2019).

Los estudios de diatomeas han sido correlacionados con análisis de tamaño de grano de los sedimentos (Espinoza-Encinas, 2012) y geoquímica de elementos mayores (Trinidad-Camarena, 2019), observándose una mayor correlación con el análisis geoquímico de los sedimentos en cuanto a la interpretación de la salinidad de la ciénega, mientras que al aumento del tamaño de grano afecta la preservación de las diatomeas, disminuyendo el número de valvas o perdiéndose el registro.

Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México) durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas

Tabla 1. Diatomeas preservadas en los sedimentos de la Ciénega Tonibabi. N: diatomeas identificadas en sedimentos de Edad Norgripiano, M: diatomeas identificadas en sedimentos de Edad Magalayano, R: diatomeas identificadas en muestras de sedimento reciente (Espinoza-Encinas, 2012; Trinidad-Camarena, 2019).

No.	Especie	Edad
1	<i>Achnanthes</i> spp.	N, M, R
2	<i>Amphora veneta</i>	N, M, R
3	<i>Anomoeoneis sphaerophora</i>	N, M
4	<i>Caloneis bacillum</i>	N, M, R
5	<i>Caloneis budensis</i>	N, M, R
6	<i>Caloneis limosa</i>	N, M
7	<i>Cocconeis placentula</i>	N, R
8	<i>Denticula elegans</i>	N, M, R
9	<i>Diploneis elliptica</i>	N, M, R
10	<i>Eunotia minor</i>	M
11	<i>Encyonema caespitosum</i>	N, M
12	<i>Epithemia adnata</i>	N, M
13	<i>Epithemia gibba</i>	N, M
14	<i>Epithemia gibberula</i>	N, M, R
15	<i>Epithemia turgida</i>	N, M
16	<i>Gomphonema pumilum</i>	N
17	<i>Mastogloia elliptica</i>	M
18	<i>Mastogloia smithii</i>	N, M, R
19	<i>Navicula brasiliensis</i>	N, M
20	<i>Navicula radiosa</i>	N, M
21	<i>Navicula splendicula</i>	M
22	<i>Nitzschia amphibia</i>	N, M, R
23	<i>Nitzschia palea</i>	N, M
24	<i>Pinnularia major</i>	N, M, R
25	<i>Pinnularia viridis</i>	N, M
26	<i>Planothidium lanceolatum</i>	M
27	<i>Surirella capronii</i>	N, R
28	<i>Surirella spiralis</i>	N, M
29	<i>Ulnaria ulna</i>	N, M, R

### 3.3.3 Estudios realizados en los sedimentos del núcleo TB2

En la Ciénega Tonibabi, Galaz-Samaniego (2017) realizó un estudio paleoecológico con palinomorfos, sobre los sedimentos de un núcleo de 49 cm de profundidad, denominado TB2 (Figura 7), con una antigüedad de 1,310 años cal. AP en la base, fecha obtenida a través del método de radiocarbono por espectrometría de masas con acelerador (AMS por sus siglas en inglés). Entre las aportaciones de su trabajo, se registró un evento de aridez entre 1,310 y 1,100 años cal. AP, seguido por una pulsación húmeda que corresponde con el Óptimo Climático Medieval (hace ~1,000 años cal. AP), así como la presencia de actividad antrópica hace ~1000, ~850-800 y ~450 años cal. AP.

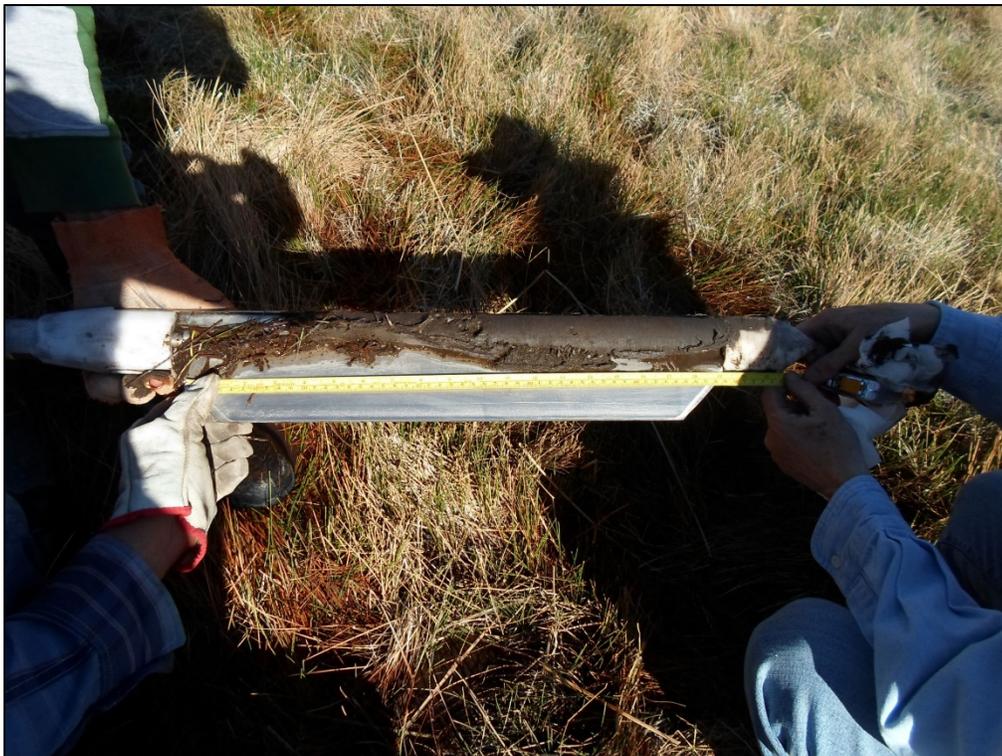


Figura 7. Núcleo TB2.

Galaz-Samaniego (2017) reconoció en el núcleo TB2 cuatro unidades sedimentológicas dominadas por limos (Figura 8), las cuales se describen a continuación:

*Unidad A.* Se encuentra entre los 49 y 44 cm de profundidad, presenta limos compactos de color gris.

*Unidad B.* Se encuentre entre los 44 y 27 cm de profundidad, presenta limos compactos de color café oscuro.

*Unidad C.* Se encuentra entre los 27 y 9 cm de profundidad, presenta limos de color café oscuro saturados en agua con guijarros menores a 1 cm.

*Unidad D.* Se encuentra entre los 9 y 0 cm de profundidad, presenta limos de color café oscuro con abundantes ciperáceas pocos degradadas.

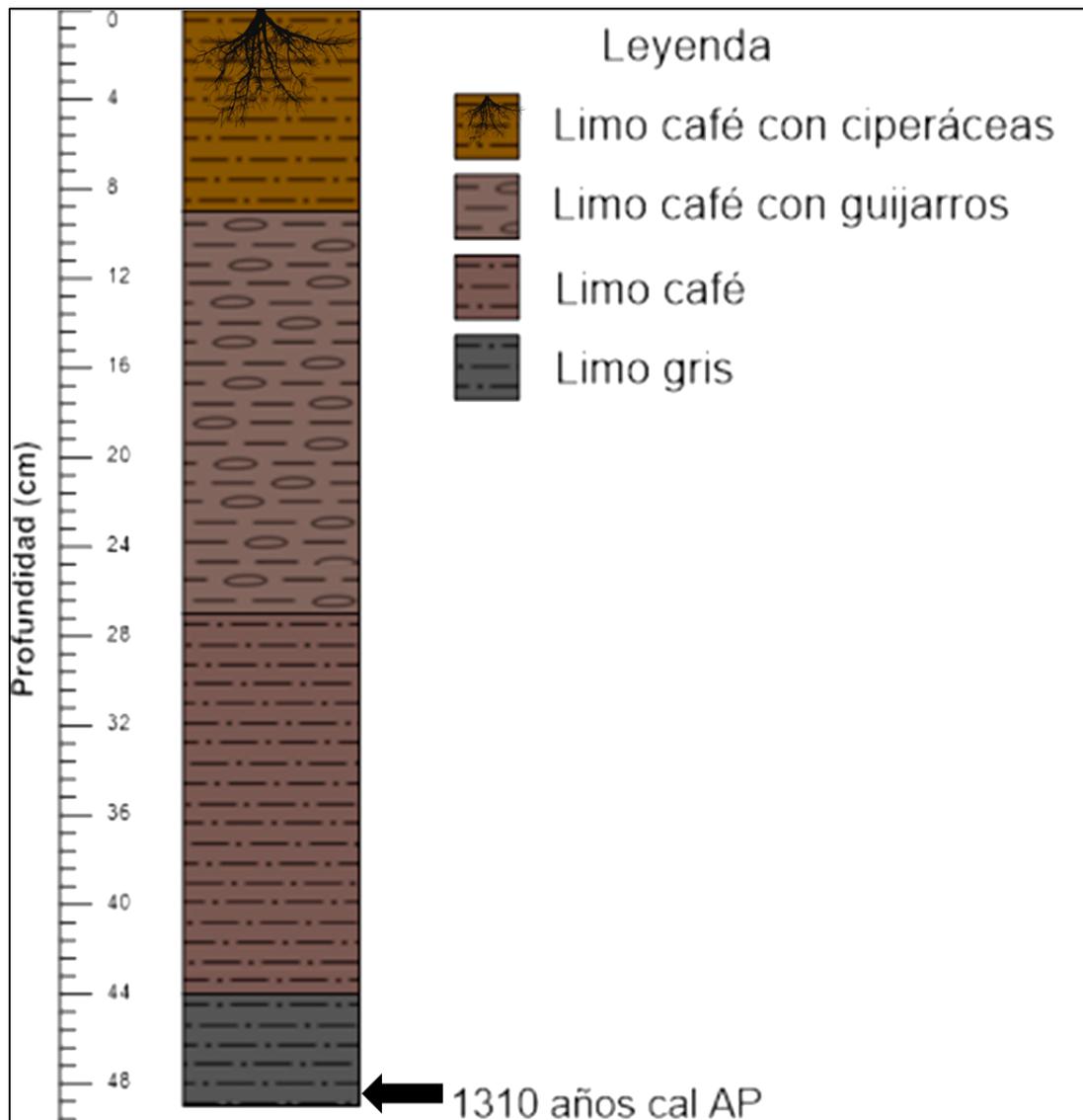


Figura 8. Litología del núcleo TB2 (Modificado de Galaz-Samaniego, 2017).

## **IV. METODOLOGÍA**

El presente trabajo consiste en el muestreo y análisis de diatomeas preservadas en el núcleo de sedimentos TB2, extraído de la ciénega Tonibabi (Moctezuma, Sonora) en marzo de 2013. La metodología descrita a continuación para este trabajo fue desarrollada en las instalaciones del Laboratorio de Recursos Naturales Terrestres del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (DICTUS).

### **4.1 Muestreo del núcleo**

Veinte muestras de sedimento, con un volumen aproximado de 9.8 cm<sup>3</sup>, fueron seleccionadas del núcleo TB2 entre las profundidades de 10 y 48 cm (Tabla 2). Las muestras fueron colocadas en recipientes de papel y deshidratadas a temperatura ambiente durante 48 horas.

### **4.2 Limpieza de sedimentos**

El procesamiento para la concentración y extracción de diatomeas en muestras de sedimento consiste en la eliminación de carbonatos y materia orgánica por digestión química (Gasse, 1986). Previo al procesamiento, se tomaron 0.5 g de sedimento seco y se colocó en un vaso de precipitado, debidamente etiquetado, esto para cada una de las muestras.

Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México) durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas

Tabla 2. Muestras seleccionadas para el análisis de diatomeas.

No.	Muestra	No.	Muestra
1	TB2-10	11	TB2-30
2	TB2-12	12	TB2-32
3	TB2-14	13	TB2-34
4	TB2-16	14	TB2-36
5	TB2-18	15	TB2-38
6	TB2-20	16	TB2-40
7	TB2-22	17	TB2-42
8	TB2-24	18	TB2-44
9	TB2-26	19	TB2-46
10	TB2-28	20	TB2-48

La digestión de carbonatos se realizó agregando 10 ml de ácido clorhídrico diluido al 10% en cada uno de los vasos de precipitado, para acelerar la reacción química los vasos de precipitado fueron colocados sobre una placa de calentamiento durante 5 minutos. A continuación, se realizó la digestión de la materia orgánica agregando en cada uno de los vasos de precipitado 30 ml de peróxido de hidrógeno diluido al 30%, durante 30 minutos sobre la placa de calentamiento.

Después de enfriarse a temperatura ambiente, el contenido de los vasos de precipitado fue vaciado en tubos de ensayo y centrifugado durante 5 minutos a 2,500 revoluciones por minuto para eliminar los ácidos. Este procedimiento se repitió en tres ocasiones más, añadiendo agua destilada para neutralizar el pH. El residuo obtenido para cada muestra fue resguardado en botellas de plástico previamente etiquetadas, aforándose a 30 ml con agua destilada.

### **4.3 Montaje de las láminas**

El montaje de las muestras se realizó colocando 50 µl de las preparaciones en un cubreobjetos, utilizando una micropipeta Transferpette® de 10 µl. Para evaporar el agua, el cubreobjetos se colocó en una placa de calentamiento. Una vez seco el cubreobjetos, se le añadió una gota de Naphrax como medio de montaje y se colocó sobre un portaobjetos ya etiquetado. Finalmente se retiró de la placa de calentamiento para que la resina pudiera enfriarse y concluir el montaje de las láminas.

### **4.4 Identificación y conteo**

Los montajes fueron observados en un microscopio óptico Leica® Galen III, con un objetivo de 100x, utilizando aceite de inmersión. La identificación taxonómica de las diatomeas observadas en las láminas y la determinación de su afinidad ecológica se realizó utilizando los trabajos de Krammer y Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a, 1991b), Van Dam *et al.* (1994) y Spaulding *et al.* 2022. Para cada una de las muestras se realizó un conteo mínimo de 300 valvas.

La abundancia de valvas de diatomeas por muestra de sedimento seco fue calculada utilizando la fórmula propuesta por Gasse (1986):

$$A_t = F \left( \frac{Ac}{(L)(D)} \right) \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \left( \frac{1}{P} \right)$$

Donde:

$A_t$  = abundancia total expresada en valvas/g de sedimento seco

F = número de valvas contadas

Ac = área del cubreobjetos

L = longitud del cubreobjetos

D = distancia del conteo

$V_1$  = volumen del frasco de almacenaje

$V_2$  = volumen tomado en la micropipeta

P = peso de sedimento seco al inicio del tratamiento

#### **4.5 Construcción del diagrama de diatomeas**

Los resultados del conteo fueron registrados en una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel®, donde fueron estimadas las frecuencias relativas para cada taxón en cada muestra. Las frecuencias relativas fueron exportadas al programa Tilia® 2.0.41 (Grimm, 1991) para construir el diagrama de diatomeas (Figura 9). Este diagrama muestra en el eje de las abscisas el porcentaje correspondiente de cada uno de los taxones de diatomeas identificados, y en el eje de las ordenadas cada una de las muestras posicionadas de forma ascendente, de tal manera que las muestras más antiguas quedan plasmados en la parte inferior del gráfico.

#### **4.6 Análisis estadísticos**

Los análisis estadísticos desarrollados con los datos obtenidos en el análisis de diatomeas para el núcleo TB2 incluyeron el análisis de agrupamiento aglomerativo y jerárquico estratigráficamente restringido (CONISS, por sus siglas en inglés), el cual permite la definición de zonas basadas en la comparación de conjuntos adyacentes (Grimm, 1987), y el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), el cual contribuye a la reducción de la dimensión del conjunto multivariante para observar las diferencias entre cada uno de los resultados de los ejes principales en que se concentra la máxima varianza (Jolliffe, 2014).

El análisis CONISS se realizó con el programa Tilia® 2.1.1 (Grimm, 1991), utilizando el método de suma total de cuadrados. El PCA se realizó con el programa Past 4.05 (Hammer *et al.*, 1999), utilizando los datos obtenidos del análisis de diatomeas sin restricción estratigráfica.

#### 4.7 Estimación del pH

Utilizando el método propuesto por Holmes *et al.* (1989) se calculó el valor de pH para cada muestra estudiada del núcleo TB2. El método consiste en calcular el valor de pH a través del uso de factores que multiplican la suma de las frecuencias relativas de cada categoría de diatomeas según sus preferencias de pH (Battarbee y Charles, 1987; Smol, 1990) a través de la siguiente fórmula:

$$pH = 7.08 - 0.0086(\%ACP) + 0.0012(\%CMN) + 0.0081(\%ALP) + 0.0210(\%ALB)$$

Donde:

ACP = acidófilas

CMN = circumneutrales

ALP = alcalófilas

ALB = alcalibiónticas

## V. RESULTADOS

En el análisis de las 20 muestras de sedimento del núcleo TB2 se identificaron 50 taxones de diatomeas (Tabla 3), de los cuales 49 fueron reconocidos a nivel de especie y uno a nivel de género.

Tabla 3. Listado de diatomeas identificadas en el núcleo TB2 y su clasificación ecológica (Van Dam *et al.*, 1994). Forma de vida: (B) bentónicas, (T) ticoplanctónicas. Salinidad: (O) oligohalobias, (M) mesohalobias, (E) euhalobias. Nivel de pH: (Alb) alcalobionte, (Alf) alcalófila, (Cn) circumneutral o indiferente, (Adf) acidófila, (Adb) acidobionte, (Sd) sin datos.

Taxón	Ecología	Salinidad	pH
<i>Achnanthes stolidia</i>	B	O	Acf
<i>Achnanthidium minutissimum</i>	B	O	Acf
<i>Anomoeoneis sphaerophora</i>	B	M	Alb
<i>Caloneis clevei</i>	B	O	Sd
<i>Caloneis molaris</i>	B	O	Cn
<i>Caloneis silicula</i>	B	O	Cn
<i>Caloneis undosa</i>	B	O	Acf
<i>Cocconeis placentula</i>	B	O	Alf
<i>Denticula elegans</i>	B	O	Alb
<i>Diploneis elliptica</i>	B	M	Alf
<i>Encyonema hamsherae</i>	B	O	Cn
<i>Encyonema minutum</i>	B	O	Cn
<i>Epithemia adnata</i>	B	O	Alb
<i>Epithemia gibberula</i>	B	M	Alf
<i>Eucoconeis laevis</i>	B	O	Cn
<i>Fragilaria vaucheriae</i>	T	O	Alf
<i>Gogorevia exilis</i>	B	O	Alf
<i>Gomphonella olivacea</i>	B	E	Alf
<i>Gomphonema gracile</i>	B	O	Cn
<i>Gomphonema parvulum</i>	B	O	Cn

Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México) durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas

Tabla 3 (continuación). Listado de diatomeas identificadas en el núcleo TB2 y su clasificación ecológica (Van Dam *et al.*, 1994). Forma de vida: (B) bentónicas, (T) ticoplanctónicas. Salinidad: (O) oligohalobias, (M) mesohalobias, (E) euhalobias. Nivel de pH: (Alb) alcalobionte, (Alf) alcalófila, (Cn) circumneutral o indiferente, (Adf) acidófila, (Adb) acidobionte, (Sd) sin datos.

Taxón	Ecología	Salinidad	pH
<i>Halamphora veneta</i>	B	O	Alb
<i>Hantzschia amphioxys</i>	B	O	Cn
<i>Mastogloia elliptica</i>	B	M	Alb
<i>Navicula cari</i>	B	O	Sd
<i>Navicula digitoradiata</i>	B	M	Alf
<i>Navicula libonensis</i>	B	M	Alb
<i>Navicula radiosa</i>	B	O	Alf
<i>Navicula recens</i>	B	M	Alf
<i>Navicula rhynchocephala</i>	B	M	Alf
<i>Navicula tenelloides</i>	B	O	Alf
<i>Navicymbula pusilla</i>	B	M	Cn
<i>Neidium ladogense</i>	B	O	Cn
<i>Nitzschia amphibia</i>	B	O	Alf
<i>Nitzschia capitellata</i>	B	O	Alf
<i>Nitzschia linearis</i>	B	M	Alf
<i>Nitzschia lorenziana</i>	B	E	Alf
<i>Nitzschia palea</i>	B	O	Cn
<i>Pinnularia sp.</i>	B	O	Cn
<i>Pinnularia major</i>	B	O	Cn
<i>Pinnularia microstauron</i>	B	O	Cn
<i>Pinnularia viridis</i>	B	O	Cn
<i>Pinnunavis elegans</i>	B	M	Acf
<i>Planothidium lanceolatum</i>	B	O	Alf
<i>Rhopalodia acuminata</i>	B	M	Alf
<i>Sellaphora pupula</i>	B	O	Cn
<i>Stauroforma exiguiformis</i>	T	M	Cn
<i>Surirella capronii</i>	B	O	Alf
<i>Surirella librile</i>	B	O	Sd
<i>Tryblionella apiculata</i>	B	E	Alf
<i>Ulnaria ulna</i>	T	O	Alf

## 5.1 Diagrama de diatomeas

Para la elaboración del diagrama de diatomeas se realizó el conteo e identificación de 6,104 valvas de diatomeas. El número estimado de valvas contenidas en un centímetro cúbico de sedimento seco (valvas/cm<sup>3</sup>) varió entre 37,926 (TB2-45) y 134,892 (TB2-30).

La especie *Denticula elegans* es la diatomea dominante en el registro de TB2, con una frecuencia relativa máxima de 59.62%. Los taxones: *Achnanthes stolidia*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Cocconeis placentula*, *Epithemia adnata*, *Epithemia gibberula*, *Eucoconeis laevis*, *Gogorevia exilis*, *Halamphora veneta*, *Mastogloia elliptica*, *Navicula radiosa*, *Navicula tenelloides*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia palea*, *Planothidium lanceolatum* y *Stauroforma exiguiiformis* presentan un porcentaje mayor a 2%, en al menos una muestra. El resto de las diatomeas (34 taxones) presentan una frecuencia relativa menor a 2%.

La representación gráfica de las frecuencias relativas de los taxones de cada muestra se observa en el diagrama de diatomeas (Figura 9), el cual fue dividido en cinco zonas, basadas en las similitudes de las asociaciones de diatomeas observadas en cada muestra, según el análisis CONISS (Figura 9).

Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México) durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas

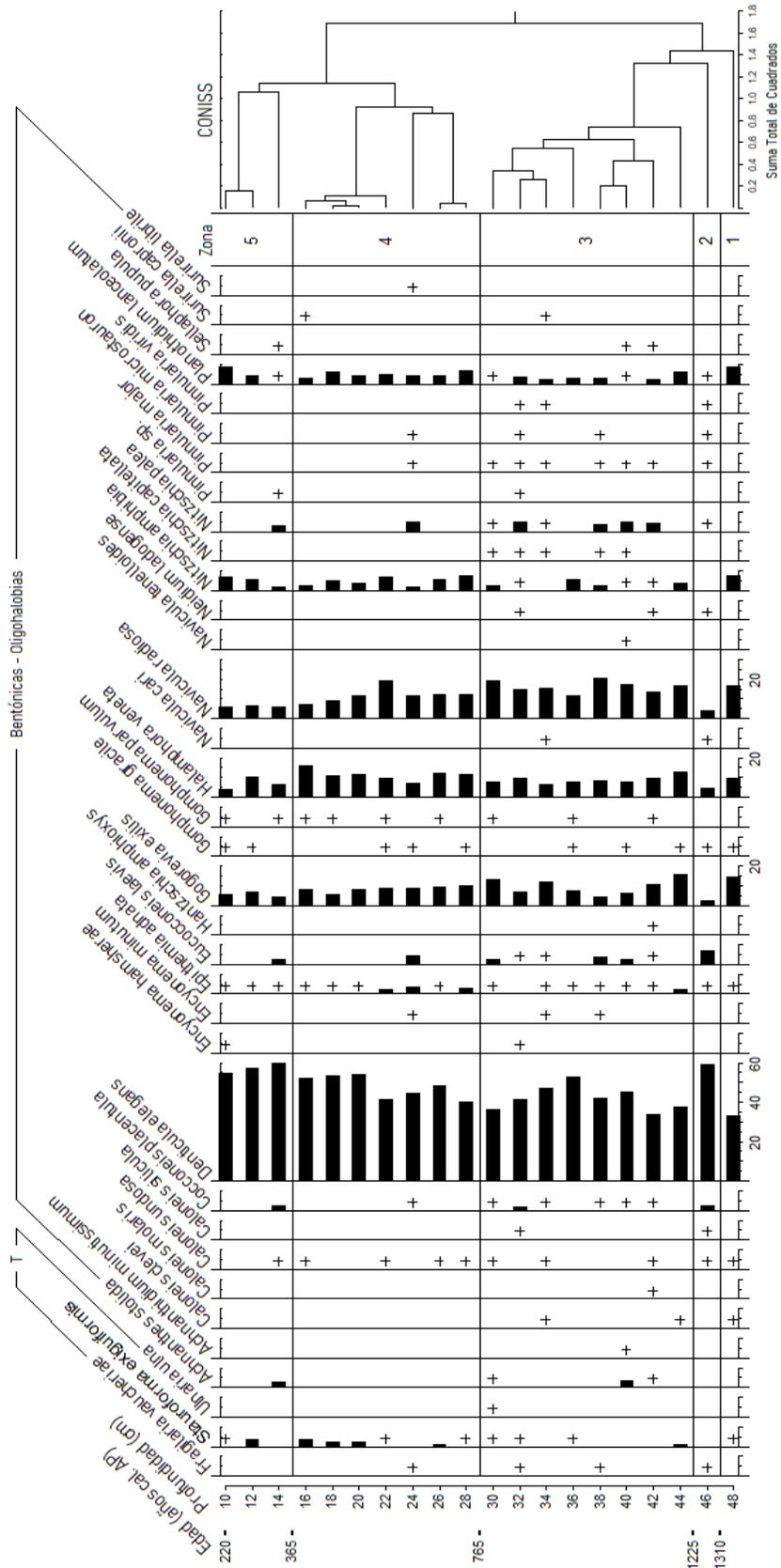


Figura 9. Diagrama de diatomeas. Diatomeas oligohalobias, tico-planctónicas (T) y bentónicas.

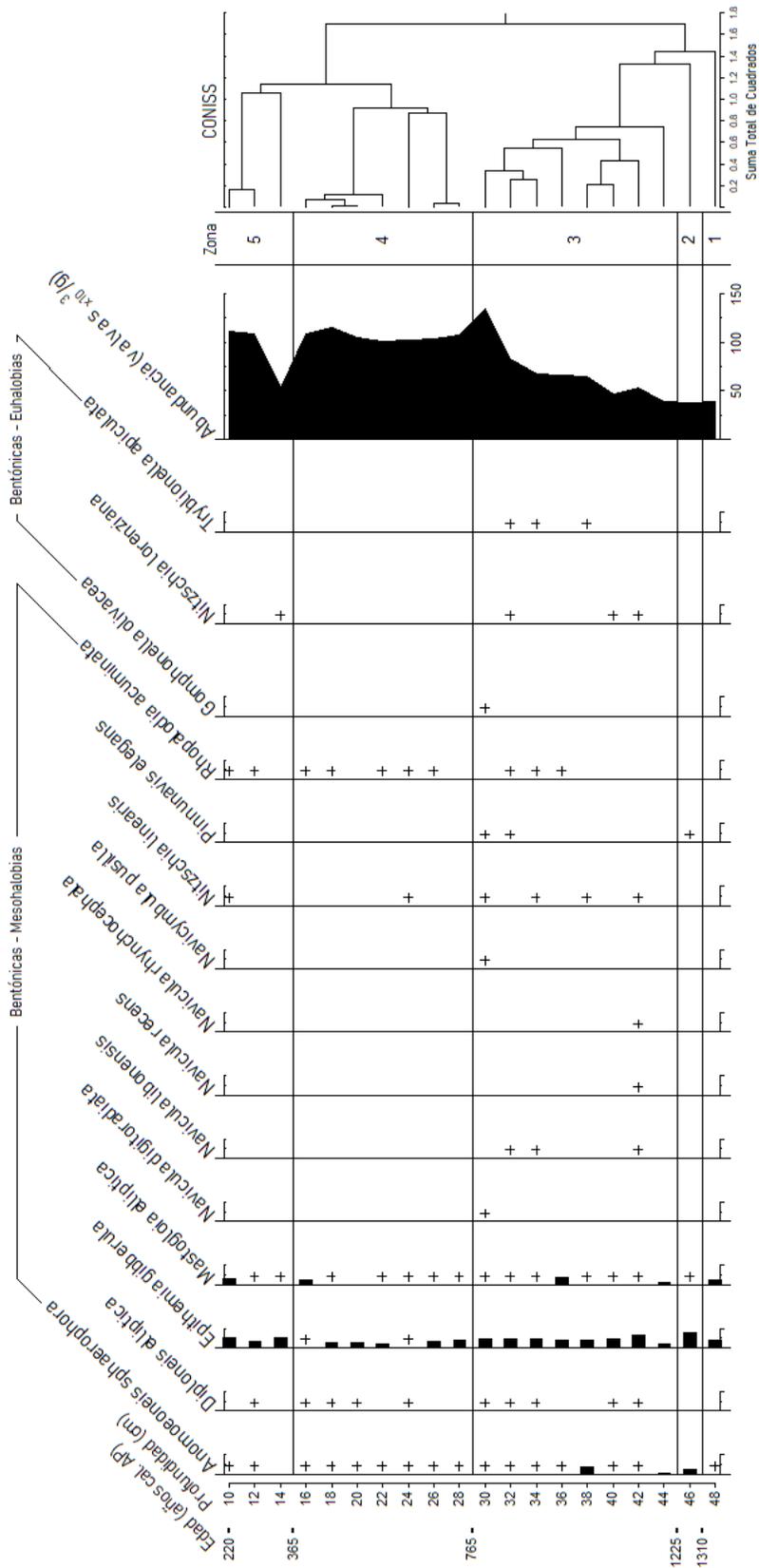


Figura 9. Diagrama de diatomeas (continuación).  
Diatomeas mesohalobias y euhalobias, y abundancia de valvas por gramo de sedimento seco.

### 5.1.1 Zona 1

La Zona 1 (48 cm; 1,300 años cal. AP) se caracteriza por el dominio de *Denticula elegans* (33%), seguida por *Navicula radiosa* (18%), *Lemmicula exigua* (15%), *Planothidium lanceolatum* (10%) y *Halamphora veneta* (10%). En menor proporción se encuentran *Nitzschia amphibia* (8%) y *Epithemia gibberula* (5%). Con porcentajes menores a 1% se presentan: *Anomoeoneis sphaerophora*, *Caloneis clevei*, *Epithemia adnata*, *Mastogloia elliptica* y *Staurosira construens*. La abundancia de diatomeas se estima en ~120,000 valvas/g.

### 5.1.2 Zona 2

La zona 2 (46 cm; 1,250 años cal. AP), se caracteriza por el dominio de *Denticula elegans* (60%), aumentando con relación al de la zona anterior, seguida por *Eucoconeis laevis* (8%) y *Epithemia gibberula* (8%). En menor proporción se encuentran *Cocconeis placentula* (3%) y *Epithemia adnata* (3%), *Anomoeoneis sphaerophora* (2%) y *Pinnunavis elegans* (2%). Con porcentajes menores al 1%, se identificaron *Caloneis silicula*, *Gomphonema gracile*, *Navicula cari*, *Nitzschia palea*, *Pinnularia major*, *Pinnularia microstauron* y *Pinnularia viridis*. La abundancia de diatomeas se estima en ~125,000 valvas/g, el mayor registro del presente estudio.

### 5.1.3 Zona 3

La Zona 3 (44 – 30 cm; 1195 – 795 años cal. AP), se caracteriza por el dominio de *Denticula elegans* (38%), registrando un aumento hasta 40% en la muestra TB2-40, seguida por *Lemnicola exigua* (16%), *Navicula radiosa* (16%) y *Halamphora veneta* (14%). En menor proporción se encuentran *Planothidium lanceolatum* (5%), *Achnanthes stolidia* (4%), *Eucoconeis laevis* (4%), *Nitzschia amphibia* (4%), *Nitzschia palea* (4%), *Anomoeoneis sphaerophora* (3%), *Mastogloia elliptica* (3%), *Cocconeis placentula* (2%) y *Epithemia gibberula* (2%) con aumento hasta 7% en la muestra TB2-42.

Con porcentajes menores a 1% se encuentran *Caloneis clevei*, *Caloneis silicula*, *Caloneis undosa*, *Diploneis elliptica*, *Encyonema hamsherae*, *Fragilaria vaucheriae*, *Gomphonema gracile*, *Gomphonema parvulum*, *Hantzschia amphioxys*, *Navicula cari*, *Navicula libonensis*, *Navicula recens*, *Navicula tenelloides*, *Navicymbula pusilla*, *Neidium ladogensis*, *Nitzschia capitellata*, *Nitzschia linearis*, *Pinnularia major*, *Pinnularia viridis*, *Pinnunavis elegans*, *Rhopalodia accuminata*, *Staurosira construens*, *Tryblionella apiculata* y *Ulnaria ulna*.

La abundancia de diatomeas oscila entre 35,600 y 118,600 valvas/g, registrándose un descenso significativo en el número de valvas estimadas, partiendo desde la base del núcleo hacia la cima de esta zona de diatomeas.

#### 5.1.4 Zona 4

La Zona 4 (28 – 16 cm; 735 – 395 años cal. AP) se caracteriza por el dominio de *Denticula elegans* (45%), registrando un aumento hasta 55% en la muestra TB2-20, seguida por *Halamphora veneta* (12%) con una disminución en la muestra TB2-24 de 6% y posteriormente un aumento hasta 16% en la muestra TB2-16, *Navicula radiosa* (12%) y un aumento hasta 20% en la muestra TB2-22 y *Lemnicola exigua* (10%).

En menor proporción se encuentra *Nitzschia amphibia* (7%), *Planothidium lanceolatum* (6%), *Epithemia gibberula* (5%), *Eucoconeis laevis* (4%), *Nitzschia palea* (4%), *Epithemia adnata* (3%), *Staurosira construens* (3%), *Mastogloia elliptica* (2%) y *Epithemia accuminata* (2%). Con porcentajes menores al 1% se encuentran *Anomoeoneis sphaerophora*, *Cocconeis placentula*, *Diploneis elliptica*, *Fragilaria vaucheriae*, *Gomphonema gracile*, *Gomphonema parvulum*, *Nitzschia linearis*, *Pinnularia major*, *Surirella capronii* y *Surirella librile*.

La abundancia de diatomeas oscila entre 40,500 y 46,500 valvas/g, registrándose un ligero incremento respecto a la zona anterior.

### 5.1.5 Zona 5

La Zona 5 (14 – 10 cm; 335 – 220 años cal. AP) se caracteriza por el dominio de *Denticula elegans* (60%), aumentando con relación a la zona anterior, seguida por *Halamphora veneta* (7%), con aumento hasta 10% en la muestra TB-12, *Navicula radiosa* (6%), *Staurosira construens* (6%), *Lemnicola exigua* (5%) y *Epithemia gibberula* (5%).

En menor proporción se encuentran *Achnanthes stolidia* (4%), *Cocconeis placentula* (4%), *Mastogloia elliptica* (4%), *Nitzschia palea* (4%), *Eucoconeis laevis* (3%), *Encyonema hamsherae* (2%), *Epithemia adnata* (2%), *Nitzschia linearis* (2%) y *Epithemia accuminata* (2%). Con porcentajes menores a 1% se encuentra *Anomoeoneis sphaerophora*, *Gomphonema gracile*, *Nitzschia lorenziana* y *Pinnularia* sp. La abundancia de diatomeas oscila entre 42,600 y 92,300 valvas/g.

## 5.2 Variación en el pH

El pH estimado a partir del método propuesto por Holmes *et al.* (1989), presenta un mínimo de 7.90 (TB2-40) y 8.08 como máximo (TB2-16), permaneciendo las aguas de la Ciénega Tonibabi con un pH ligeramente alcalino durante el periodo que abarca el presente estudio.

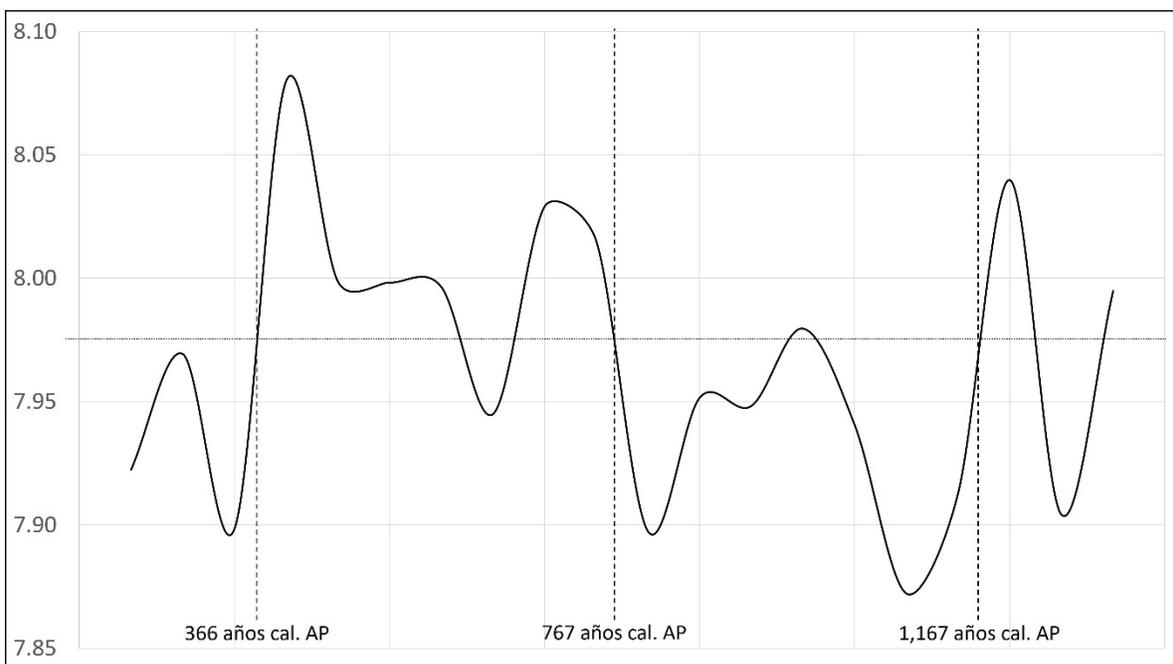


Figura 10. Cambios en el pH de la Ciénega de Tonibabi, Sonora.

A partir de los resultados de la estimación de pH se muestran cuatro etapas de cambios en este parámetro. La primera ocurre antes de 1,167 años cal. AP con una gran variabilidad en cada muestra. La segunda etapa ocurre en el periodo de 1,167 a 767 años cal. AP, donde se observa un pH con tendencia por debajo de la media. La tercera etapa ocurre entre 767 y 366 años cal. AP, en la cual se observa una tendencia hacia el incremento del pH (excepto la muestra TB2-24). Finalmente, la

última etapa presenta una disminución del pH en las aguas de la ciénega, a partir de 366 años cal. AP.

### **5.3 Análisis de componentes principales**

El análisis de componentes principales presenta un primer componente con una varianza del 66.36% y el segundo componente una varianza del 14.30%, sumando 80.663% de la varianza total del análisis. El análisis divide las muestras estudiadas en cuatro subconjuntos (Figura 11).

En el subconjunto A se agrupan principalmente muestras de la zona 4, el subconjunto B presenta una muestra de la Zona 2 y otra de la Zona 5, el subconjunto C es el que presenta mayor desigualdad respecto a los resultados del análisis CONISS con muestras de las zonas 5, 3 y 2, y el subconjunto D que agrupa muestras de las zonas 3, 4 y 5.

Es importante mencionar que el análisis de componentes principales no toma en cuenta la restricción estratigráfica de las muestras, como si lo hace el análisis CONISS, por lo que se presume un agrupamiento más relacionado con las asociaciones de las diatomeas presentes en las muestras estudiadas.

Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México) durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas

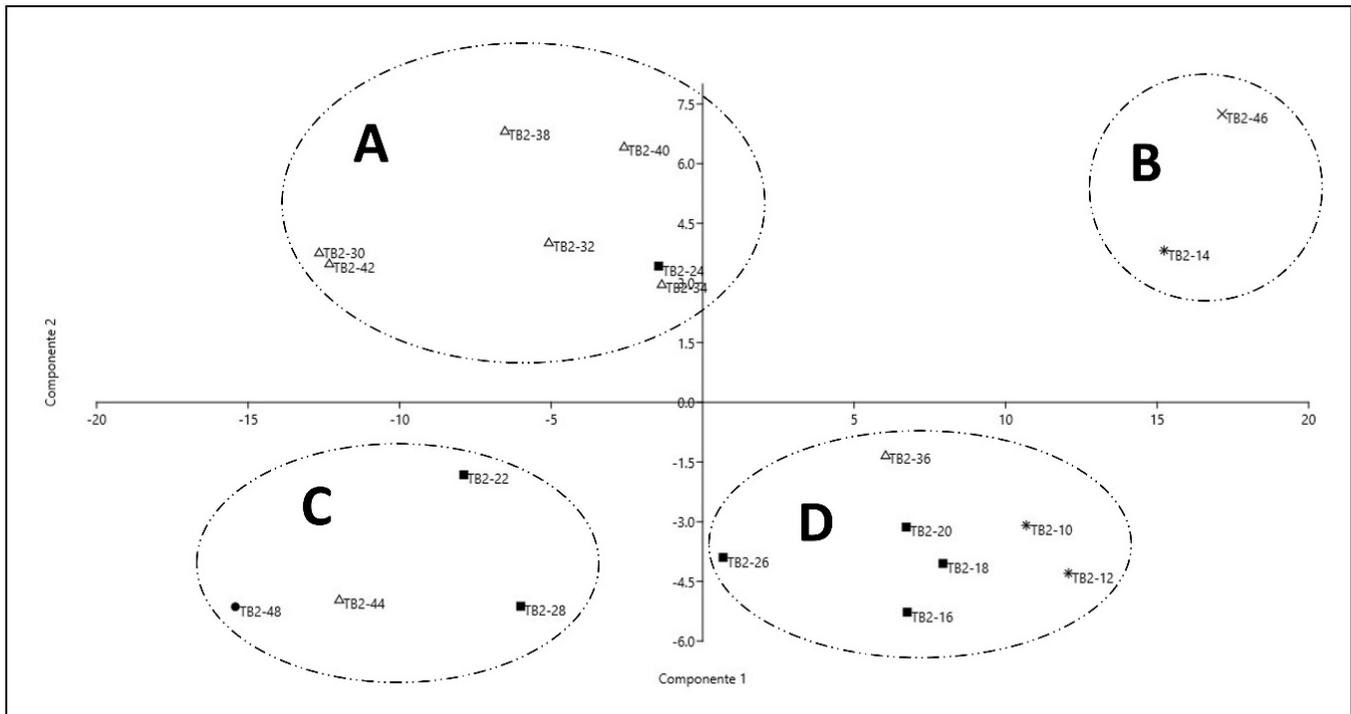


Figura 11. Análisis de componentes principales.

Se incluyen todas muestras analizadas: muestras de la Zona 1 representada por un círculo, muestras de la Zona 2 representadas por una cruz, muestras de la Zona 3 representadas por un cuadrado, muestras de la Zona 4 representadas por un triángulo y muestras de la Zona 5 representadas por un asterisco.

## **VI. DISCUSIÓN**

Los resultados obtenidos a través del análisis de diatomeas preservadas en los sedimentos del núcleo TB2, permiten realizar la reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi para el periodo comprendido entre 1,300 y 270 años cal. AP, a partir de las características ecológicas asociadas a los conjuntos de diatomeas identificadas en los niveles estudiados del núcleo. El análisis de los resultados permite también inferir las condiciones paleoclimáticas que prevalecieron en la región centro de Sonora y comparar los resultados obtenidos con otras investigaciones de la misma temática.

### **6.1 Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi**

Los registros obtenidos en el análisis de diatomeas del núcleo TB2 sugieren que, durante una primera etapa de depósito de sedimentos (1310 a 1200 años cal. AP), la ciénega experimentaba condiciones de baja humedad con aguas salobres y pH menor a 8 (Figura 12), como lo muestra la abundancia de diatomeas de forma de vida bentónica y preferencia por condiciones mesohalobias. El pH alcalino parece una constante entre las estimaciones de los parámetros fisicoquímicos de la Ciénega Tonibabi, según lo demuestran las reconstrucciones hechas por Espinoza-Encinas (2012) y Trinidad-Camarena (2019), así como las mediciones más recientes (Almirudis *et al.*, 2018).

Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega Tonibabi (Sonora, México) durante los últimos 1,300 años, a partir del análisis de diatomeas

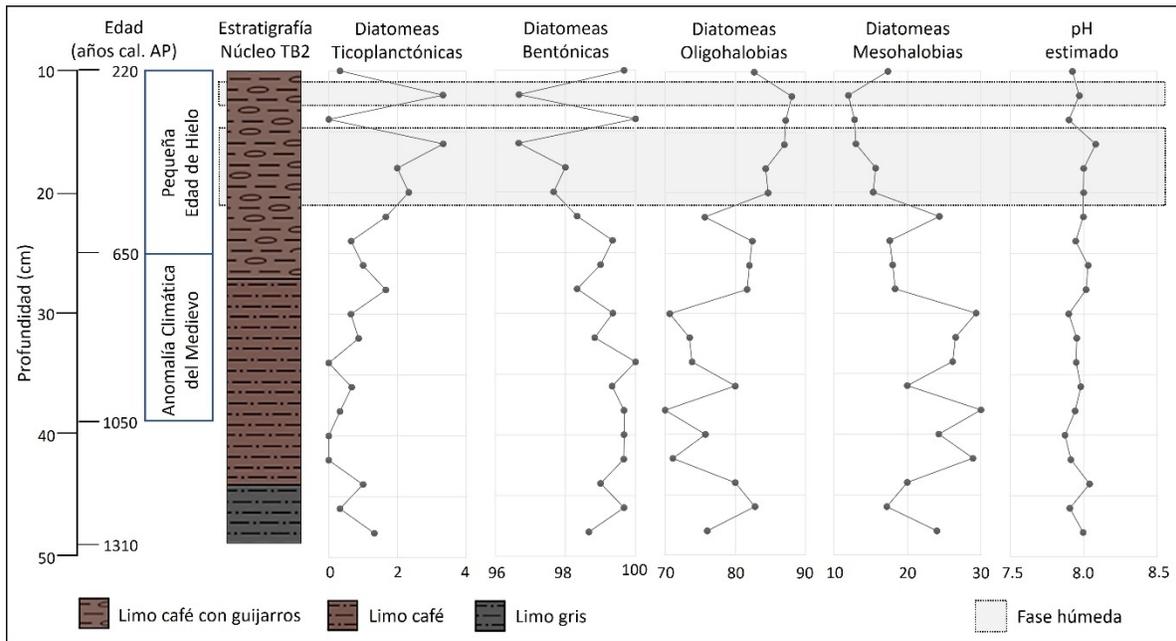


Figura 12. Reconstrucción paleoecológica de la Ciénega de Tonibabi.

Durante la segunda etapa de depósito de sedimentos (1,200 a 710 años cal. AP), las condiciones de baja humedad y pH menor a 8 prevalecen en la ciénega, registrándose un ligero aumento en la salinidad del agua (Figura 12). El registro de diatomeas bentónicas mantiene frecuencias relativas similares a la etapa anterior, lo que sugiere que la ciénega se mantiene con una humedad baja, pero constante, como lo muestran los porcentajes de polen de especies herbáceas locales (Cyperaceae y Poaceae) en un estudio de paleovegetación de la ciénega (Galaz-Samaniego, 2017), lo cual se refleja también en el aumento de diatomeas epífitas como *Cocconeis placentula* y *Gomphonema* spp. Las diatomeas mesohalobias son más abundantes, alcanzando una proporción cercana al 30%, el mayor porcentaje de este conjunto en el presente estudio. Aún más significativo es

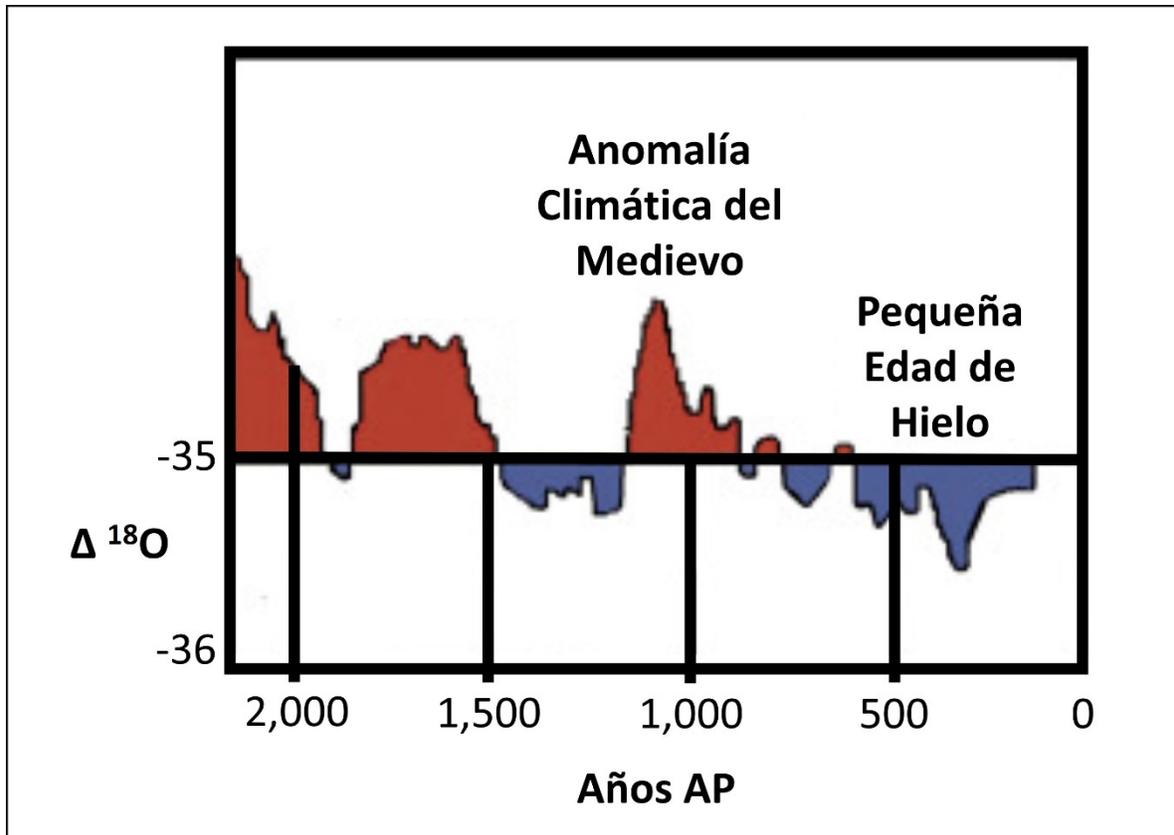
el aumento en la presencia y diversidad de diatomeas euhalobias durante esta etapa (Figura 9), acentuando las condiciones de mayor salinidad, con la presencia de *Gomphonella olivácea*, *Nitzschia lorenziana* y *Tryblionella apiculata*.

Durante la tercera etapa de depósito de sedimentos (710 a 220 años cal. AP), se registran varias oscilaciones en los niveles de agua, salinidad y pH de la ciénega (Figura 12). En esta tercera etapa de sedimentación, la granulometría varía entre partículas de limo y guijarro (Galaz-Samaniego, 2017), indicando un aumento en la energía del ambiente. Estas condiciones de mayor humedad se correlacionan con una mayor representación de polen regional externo a la ciénega en los registros del núcleo TB2 (Galaz-Samaniego, 2017), y con el aumento en las frecuencias relativas de diatomeas de forma de vida ticoplanctónica (2-4%), con especies como *Fragilaria vaucheriae*, *Stauroforma exiguiformis* y *Ulnaria ulna*. Espinoza-Encinas (2012), en un estudio sobre la composición y distribución de diatomeas en la Ciénega Tonibabi, reporta un incremento en las frecuencias relativas de diatomeas ticoplanctónicas en los sitios donde se observa un mayor tirante de agua (Espinoza-Encinas, 2012). Un incremento en la humedad también sugiere una disminución en la salinidad del agua de la ciénega, durante estas fases de mayor humedad el registro de las diatomeas oligohalobias presentan un aumento en sus frecuencias relativas (Figura 12), mientras las especies mesohalobias disminuyen.

## 6.2 Reconstrucción paleoclimática en la región centro de Sonora

El registro de los sedimentos del núcleo TB2 cubre un periodo de tiempo comprendido entre ~1,310 y 220 años cal. AP, aproximadamente entre los años ~640 y 1730 d.C. (*Anno Dómininota*, “en el año del señor” en latín). Este periodo de tiempo incluye dos de los más importantes eventos climáticos de la historia reciente, la Anomalía Climática del Medievo, un periodo cálido, y la Pequeña Edad de Hielo, un periodo frío.

La Anomalía Climática del Medievo, anteriormente denominada Periodo Cálido Medieval u Óptimo Climático Medieval (Mann, 2002), es un periodo climático de la historia reciente de la Tierra, entre el año 900 y 1300 d.C., durante el cual las temperaturas en Europa y Norte América fueron comparables o incluso superiores a las observadas a finales del siglo XX (Mann, 2002; Easterbrook, 2011). Este período climático es uno de los más controvertidos del Megalayiano, según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, quienes afirman que sin un aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera, no hay aumento de las temperaturas globales (Easterbrook, 2011); sin embargo, los datos isotópicos de oxígeno del núcleo de hielo de Groenlandia GISP2 muestran una señal clara de la Anomalía Climática del Medievo (Figura 13). Al finalizar el la Anomalía Climática del Medievo (1300 d.C.), las temperaturas disminuyeron considerablemente, dando paso al periodo climático conocido como la Pequeña Edad de Hielo (Easterbrook, 2011).



*Figura 13.* Curva de isótopos de oxígeno del núcleo de hielo GISP2, Groenlandia (Tomado de Easterbrook, 2011). En color café los periodos cálidos, en color azul los periodos fríos.

La Pequeña Edad de Hielo es una época de continuos cambios entre periodos fríos y cálidos relacionados con la actividad solar (Easterbrook, 2011). Durante estas etapas de enfriamiento, la actividad solar se caracterizó por presentar un bajo número de manchas solares, una baja irradiación y la disminución del magnetismo solar, eventos reconocidos entre los años 1300 y 1800 d.C. (Easterbrook, 2011).

### **6.2.1 Entre 1,310 y 1,050 años cal. AP**

En los registros de la Ciénega Tonibabi se reconocieron condiciones climáticas cálidas y secas anteriores a la Anomalía Climática del Medievo. Hace ~2,300 años cal. AP, las asociaciones de diatomeas (con el incremento de especies como *Epithemia gibberula*), y la presencia de biomarcadores químicos (por ejemplo, escualeno), sugieren condiciones hipersalinas asociadas a ambientes evaporíticos (Espinoza-Encinas, 2012). Entre ~2,200 y 1,800 años cal. AP, la geoquímica de los sedimentos sugieren también condiciones secas imperantes en la región de la Ciénega Tonibabi (Trinidad-Camarena, 2019). Entre ~1,300 y 1,100 años cal. AP los registros polínicos se correlacionan con condiciones atmosféricas secas (Galaz-Samaniego, 2017). En el presente estudio, las asociaciones de diatomeas también sugieren la presencia de condiciones secas en la ciénega (Figura 9).

### **6.2.2 Anomalía Climática del Medievo**

Las condiciones de baja humedad se acentúan en la ciénega durante la Anomalía Climática del Medievo. En los registros de diatomeas se observan las menores frecuencias relativas de diatomeas de forma de vida ticoplanctónica (Figura 12), relacionadas con una profundización de las aguas donde habitan, se registra también un aumento en las diatomeas mesohalobias y euhalobias, asociadas con el aumento de la salinidad del agua (Van Dam *et al.*, 1994; Spaulding *et al.* 2022). Los registros polínicos de la Ciénega Tonibabi también sugieren una pulsación árida en la región durante este periodo climático (Galaz-Samaniego, 2017), donde se

observó el aumento de granos de polen de *Amaranthaceae* y la disminución de polen de *Pinus*.

### 6.2.3 Pequeña Edad de Hielo

El registro de diatomeas del presente estudio, indica la presencia de tres fases secas y dos fases húmedas durante el periodo climático de la Pequeña Edad de Hielo (Figura 12), que en este estudio comprende entre el año 1300 y 1730 d.C., aproximadamente. En el estudio polínico del núcleo TB2 (Galaz-Samaniego, 2017) también se interpreta una fase húmeda ocurrida entre el año ~1340 y 1550 d.C., donde el aumento de la humedad favoreció el incremento de la cubierta herbácea por *Amaranthaceae* y *Cyperaceae*, favoreciendo una mayor dispersión polínica, y el posible asentamiento humano en los alrededores de la ciénega por la presencia de polen de cultivos.

La primera fase seca ocurre entre ~1300 y 1390 d.C., en ella se presentan frecuencias relativas de diatomeas mesohalobias similares a las observadas durante la Anomalía Climática del Medievo, y bajos porcentajes de especies ticoplanctónicas (Figura 12).

La primera fase húmeda ocurre entre ~1390 y 1580 d.C., se correlaciona con el *Mínimo de Spörer* (~1460 a 1550 d.C.; Easterbrook, 2011). Una segunda fase húmeda ocurre en el año 1670 d.C., la cual se correlaciona con el *Mínimo de Maunder* (~1645 a 1715 d.C.; Easterbrook, 2011). Durante estas fases de mayor

humedad, se incrementan las frecuencias relativas de diatomeas de forma de vida ticoplanctónica y las diatomeas oligohalobias (Figura 12), diatomeas que sugieren un incremento en la tirante de agua en la ciénega y a una disminución de la salinidad de sus aguas.

Las fases intermedias, más secas, ocurridas en los años ~1610 y ~1730 d.C., se caracterizan por una disminución de las diatomeas de forma de vida ticoplanctónica, y el aumento de las especies bentónicas (Figura 12).

## VII. CONCLUSIONES

El presente estudio de los sedimentos de la Ciénega Tonibabi los cambios paleoecológicos ocurridos durante los últimos 1,300 años. La diversidad de flora de diatomeas identificadas incluye 50 taxones, siendo *Denticula elegans* el más abundante de ellos.

El análisis paleoecológico de las asociaciones de diatomeas permitió identificar una fase inicial seca, entre ~1,310 y 560 años cal. AP (año 640 a 1390 d.C.), la cual incluye la Anomalía Climática del Medievo. Durante esta fase inicial dominan las diatomeas de forma de vida bentónica, con afinidad a aguas salobres y un pH ligeramente alcalino (<8).

Dos fases más húmedas se registran de ~560 – 370 años cal. AP (~1390 – 1580 d.C.), y hace ~280 años cal. AP1670, correlacionadas con el *Mínimo de Spörer* y el *Mínimo de Maunder*, respectivamente, durante la Pequeña Edad de Hielo. En estas fases húmedas se registra un ligero incremento en las frecuencias relativas de las diatomeas de forma de vida ticoplanctónicas, mientras que el registro de especies con afinidad a aguas de baja salinidad presenta los mayores porcentajes en este estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almirudis, E., Santoyo-Gutierrez, E. R., Guevara, M., Paz-Moreno, F., & Portugal, E. (2018). Chemical and isotopic signatures of hot springs from east-central Sonora State, Mexico: a new prospection survey of promissory low-to-medium temperature geothermal systems. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 35(2), 116-141.
- Armstrong, H. A., y Brasier, M. D. (2004). *Microfossils* (2da ed.). Oxford, Inglaterra.
- Bardají, T. (2018). Subdivisión formal del Holoceno. *Cuaternario y Geomorfología*, 32(3-4), 7-8.
- Barsanti, L., y Gualtieri, P. (2010). *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*. CRC Press.
- Battarbee, R. (1986). Handbook of Holocene palaeoecology and paleohydrology. En B. Berglund (Ed.).
- Battarbee, R. W., Jones, V. J., Flower, R. J., Cameron, N. G., Bennion, H., Carvalho, L. y Juggins, S. (2001). Diatoms. En J. P. Smol, *Tracking environmental change using lake sediments Vol 3: Terrestrial, algal and siliceous indicators* (págs. 155-202). Dordrecht, Kluwer.
- Battarbee, R. W., y Charles, D. F. (1987). The use of diatom assemblages in lake sediments as a means of assessing the timing, trends, and causes of lake acidification. En *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* (Vol. 11, págs. 552-580).
- Bory de Saint-Vincent, J. B. M., & Coll. (1822-1831). *Dictionnaire Classique d'Histoire Naturelle* (Vols. 1-17). Paris. Rey & Gravier, libraires-éditeurs; Baudouin Frères, libraires-éditeurs.
- Brasier, M. D. (1980). *Microfossils*. London: G. Allen y Unwin.
- Brébisson, A. (1838). *Considérations sur les Diatomées et essai d'une classification des genres et des espèces appartenant à cette famille*. Brée l'Ainé Imprimeur-Libraire, Falaise.
- Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Felger, R. S. y Yetman, D. (1999). Vegetation and Habitat Diversity at the Southern Edge of the Sonoran Desert. En R. H. Robichaux (Ed.), *Ecology of Sonoran Desert Plants and Plant Communities* (págs. 36-67). Tucson, Arizona, EE.UU: University of Arizona Press.
- Caballero, M., Rodriguez, A., Vilaclara, G., Ortega, B., Roy, P., y Lozano-García, S. (2013). Hydrochemistry, ostracods and diatoms in a deep, tropical, crater lake in Western Mexico. *Journal of Limnology*, 72(3), 512-523.

- Cabrera, F., Corona, A., Daners, G., Soto, M., Ubilla, M., Verde, M., Martínez, S., Mesa, V., & Rojas, A. (2018). Fundamentos de paleontología.
- Camacho, H. H., y Longobucco, M. I. (2008). *Los invertebrados fósiles*. (V. Mazzini, Ed.) Buenos aires.
- Chatton, É. (1925). Pansporella preplexa, amoebien à spores protégées parasite de daphnies Réflexions sur la biologie et la phylogénie des protozoaires. *Annales des Sciences Naturelles, Zoologie*, 10(8), 5-84.
- Cleve, P. T. (1891). The Diatoms of Finland. En *Actas Societas Pro Fauna et Flora Fennica* (Vol. 8, págs. 1-68).
- Cleve, P. T. (1894). Synopsis of the Navicoloid Diatoms, Part I. En *Kongliga Svenska-Vetenskaps Akademiens Handlingar* (Vol. 26, págs. 1-194).
- Cleve, P. T. (1894-5). Synopsis of the Navicoloid Diatoms, Part 1 & 2. *K. svenska VetenskAkad. Handl*, 26(2), 1-194.
- Cohen, K. M., Finney, S. C., Gibbard, P. L. & Fan, J. X. (2013; updated). The ICS International Chronostratigraphic Chart.
- Compère, P. (2001). Ulnaria (Kützing) Compère, a new genus name for *Fragilaria* subgen. *Alterasynedra* Lange-Bertalot with comments on the typification of *Synedra* Ehrenberg. En R. Jahn, J. P. Kociolek, A. Witkowski, & P. Compère (Edits.), *Lange-Bertalot-Festschrift: Studies on Diatoms: Dedicated to Prof. Dr. Dr. h. c. Horst Lange-Bertalot on the Occasion of his 65th Birthday* (págs. 97-102). Gantner Verlag, K. G.
- Crosta, X. y Koç, N. (2007). Chapter Eight Diatoms: From Micropaleontology to Isotope Geochemistry. En *Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography* (Vol. 1, págs. 327-369). ELSEVIER.
- Czarnecki, D. B. (1994). The Freshwater Diatom Culture Collection at Loras College, Dubuque, Iowa. En J. P. Kociolek (Ed.), *Proceedings of the 11th International Diatom Symposium* (págs. 155-173). San Francisco, California: California Academy of Sciences.
- Dippel, L. (1905). *Diatomeen der Rheine-mainebene*. Braunschweig: Vieweg und Sohn.
- Duhalde, L. (2020). *Acercamiento geo-arqueológico con diatomeas fósiles en el contexto agro-arqueológico de Pampa Iluga, Quebrada de Tarapacá*.
- Easterbrook, D. J. (2011). Geologic Evidence of Recurring Climate Cycles and Their Implications for the Cause of Global Climate Changes—The Past is the Key to the Future. (D. Easterbrook, Ed.) *Evidence-Based Climate Science*, 175-266.

- Ehrenberg, C. G. (1831-2). Über die Entwicklung und Lebensdauer der Infusionsthier; nebst ferneren Beiträgen zu einer Vergleichung ihrer organischen Systeme. En *Abhandlungen der Königlich-Akademie der Wissenschaften zu Berlin*. (págs. 1-154).
- Ehrenberg, C. G. (1836). Mittheilungen über fossile Infusionsthier. *Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 50-54.
- Ehrenberg, C. G. (1838). *Die Infusionsthierchen als vollkommene Organismen. Ein Blick in das tiefere organische Leben de Natur*. Leipzig: Verlag von Leopold Voss.
- Ehrenberg, C. G. (1843). Mittheilungen über 2 neue asiatische Lager fossiler Infusorien-Erden aus dem russischen Trans-Kaukasien (Grusien) und Sibirien. Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten. *Verhandlungen der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 43-49.
- Ehrenberg, C. G. (1845). *Vorläufige zweite Mettheilung über die weitere Erkenntnifs der Beziehungen des kleinsten organischen Lebens zu den vulkanischen Massen der Erde Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*. Obtenido de <https://www.biodiversitylibrary.org/item/41529#page/137>
- Engler, A., & Gilg, E. (1919). *Syllabus der Pflanzenfamilien: eine Übersicht über das gesamte Pflanzensystem mit besonderer Berücksichtigung der Medicinal- und Nutzpflanzen, nebst einer Übersicht über die Florenreiche und Florengebiete der Erde zum Gebrauch bei Vorlesungen und Studien über spezielle und medizinisch-pharmazeutische Botanik* (8 ed.). Berlin: Gebrüder Borntraeger Verlag.
- Espinoza-Encinas, I. R. (2012). *Paleoambientes cuaternarios de la ciénega Tonibabi, Moctezuma, Sonora, México*. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., y Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281, 237-240.
- Flower, R. J., Jones, V. J., and Round, F. E. (1996). The distribution and calssification of problematic *Fragilaria (virescens v.) exigua* Grun. /*Fragilaria exiguiformis* (Grun.) Lange-Bertalot: a nwe species or new genus? *Diatom Research*, 11(1), 41-57.
- Galaz-Samaniego, C. (2017). *Vegetación de la ciénega tonibabi, municipio de moctezuma, sonora, méxico, en los últimos 1500 años*. Tesis de

Licenciatura, Universidad de Sonora, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Hermosillo.

- Galaz-Samaniego, C. (2019). *Transición del Pleistoceno al Holoceno en la vertiente sur de la Sierra La Madera (Moctezuma, Sonora, México): sedimentos y paleoambientes*. Tesis Maestro en Ciencias-Geología, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Hermosillo, Sonora.
- Gasse, F. (1986). *East African diatoms: Taxonomy, ecological distribution* (Vol. 11). Bibliotheca Diatomologica.
- Gervais, P. (1867). *Zoologie et Paléontologie générales: Nouvelles Recherches sur les Animaux vertébrés vivants et fossiles*. (A. Bertrand, Ed.)
- Gibbard, P. L., Head, M. J. (2009). IUGS ratification of the Quaternary system/period and the Pleistocene series/Epoch with a base at 2.50 M.a. *Quaternaire*, 20(4), 411-412.
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Raucha-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta botánica mexicana*(100), 351-403.
- Gregory, W. (1856). Notice of somenew species of British freshwater diatomaceae. *Quarterly Journal of Microscopical Science*, 4, 35-48.
- Gregory, W. (1857). On new forms of marine Diatomaceae found in the firth of clyde and in Loch fine. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 21(4), 473-542.
- Grimm, E. C. (1987). CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by method of incremental sum of squares. *Computers and Geoscience*, 13(1), 13-35.
- Grimm, E. C. (1991). Tilia Graph 2.0.41. *Illinois State Museum*, 101.
- Grunow, A. (1862). Die Österreichischen diatomaceen nebst anschluss einiger neuen Arten von anderen Lekalitäten und einer Kritischen Uebersicht der bisher bekannten Gattungen und Arten. *Verb. Zool-Bot. Ges. Wien*(12), 315-472.
- Grunow, A. (1863). Ueber einige neue und ungenügend bekannte Arten und Gattungen von Diatomaceen. *Verhandlungen der Kaiserlich-Königlichen Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Wien*, 13, 137-162.
- Grunow, A. (1877). New diatoms from Honduras. *Journal of Microscopy*, 18, 165-186.

- Haeckel, E. (1866). *Generelle Morphologie der Organismen: allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft, mechanisch begründet durch die von C. Darwin reformirte Decendenz-Theorie*. Berlín.
- Hällfors, G. (2004). Checklist of Baltic Sea Phytoplankton Species (including some heterotrophic protistan groups). *Baltic Sea Environment Proceedings*(95), 210.
- Hammer, O. (1999). *Paleontological Statistics*. University of Oslo., Oslo, Noruega.
- Hasle, R. G., & Syvertsen, E. E. (1997). *Identifying Marine Phytoplankton: Chapter 2 - Marine diatoms*. (C. Tomas, Ed.) St. Petersburg, Florida: Academic Press.
- Hassall, A. H. (1845). *History of the British Freshwater algae*. Londres.
- Hendey, N. I. (1937). The plankton diatoms of the southern seas. *Discovery rep*, 16, 151-364.
- Holmes, R. W., Whiting, M. C. y Stoddard, J. L. (1989). Changes in diatom-inferred pH and acid neutralizing capacity in a dilute, high elevation, Sierra Nevada lake since A.D. 1825. *Freshwater Biology*, 21(2), 295-310.
- Hustedt, F. (1931-1966). . Die Kieselalgen von Deutschlands, Österreichs und der Schweiz unter Berücksichtigung der übrigen Länder Europas sowie der angrenzenden Meeresgebiete. En L. Rabenhorst (Ed.), *Kryptogamen flora, von Deutschland, Österreich und der Schweiz* (Vol. 7, págs. 1-845).
- Hustedt, F. (1957). Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Verein zu Bremen. En *Die Diatomeenflora des Flußsystems der Weser im Gebiet der Hansestadt Bremen* (Vol. 34, págs. 181-440).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Moctezuma, Sonora*.
- Jain, S. (2020). Marine Diatom. En S. Jain (Ed.), *Fundamentals of invertebrate paleontology, microfossils* (págs. 131-142). Springer, Nature India.
- Jolliffe, I. (2014). Principal Component Analysis. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*.
- Kolbe, R. W. (1927). Zur Ökologie, Morphologie und Systematik der Brackwasser-Diatomeen: die Kieselalgen des Sperenberger Salzgebiets. *Pflanzenforschung*, 7, 146.
- Krammer, K. (2003). *Cymbopleura, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocybella* Diatoms of Europe. En *Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats* (Vol. 4, págs. 1-530).

- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1986). *Süsswasserflora von Mitteleuropa Bacillariophyceae, Teil i Naviculaceae*. (G. F. Verlag Stuttgart, Ed.)
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1988). *Süsswasserflora von Mitteleuropa Bacillariophyceae, Teil ii Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. (G. F. Verlag Stuttgart, Ed.)
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1991a). *Süsswasserflora von Mitteleuropa Bacillariophyceae, Teil iii Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. (G. F. Verlag Stuttgart, Ed.)
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1991b). *Süsswasserflora von Mitteleuropa Bacillariophyceae, Teil iv Achnantheaceae*. (G. F. Verlag Stuttgart, Ed.)
- Krammer, K., and Lange-Bertalot, H. (1985). *Naviculaceae Neue und wenig bekannte Taxa, neue Kombinationen und Synonyme sowie Bemerkungen zu einigen Gattungen*. (Vol. 9). Bibliotheca Diatomologica.
- Krassilov, V. A. (2003). *Terrestrial paleoecology and global change*. Bulgaria: Pensoft publishers.
- Krasske, G. (1949). Subfossile Diatomeen aus den Mooren Patagoniens und Feuerlands. *Suomalaisen Tiedeakatemia Toimituksia Annales Academiae Scientiarum Fennicae, Sarja Series A. IV, Biologica.*, , 14-95.
- Kützing, F. T. (1844). *Die Kiesselschaligen Bacillarien oder Diatomeen*. Nordhausen.
- Kützing, F. T. (1833). *Synopsis Diatomearum, oder, Versuch einer systematischen Zusammenstellung der Diatomeen* (Vol. 8).
- Lam, C. W. Y., & Ho K. C. (1988). Phytoplankton characteristics of Tolo Harbour. *Asian Marine Biology*, 6, 5-18.
- Lange-Bertalot, H. (1999). Neue Kombinationen von taxa aus *Achnanthes Bory* (sensu lato). *Iconographia Diatomologica*, 6, 276-289.
- Lange-Bertalot, H., and Genkal, S. I. (1999). Diatoms from Siberia I. Islands in the Arctic Ocean (Yugorsky-Shar Strait). *Iconographia Diatomologica*, 6, 1-292.
- Levkov, Z. (2009). *Amphora* sensu lato. En H. Lange-Bertalot (Ed.), *Diatoms of Europe* (Vol. 5, pág. 916). A.R.G. Gantner Verlag K.G.
- López-Fuerte, F. O. y Siqueiros-Beltrones, D. A. (2011). Las diatomeas como indicadores de la calidad ecológica de los oasis de Baja California Sur. *Biodiversitas.*, 8-11.
- Lowe, J. J., y Walker, M. J. C. (2015). *Reconstructing Quaternary Environments*. Inglaterra.

- Lyngbye, H. C. (1819). *Tentamen Hydrophytologiae Danicae Continens omnia Hydrophyta Cryptogama Daniae, Holsatiae, Faeroae, Islandiae, Groenlandiae hucusque cognita, Systematice Disposita, Descripta et iconibus illustrata, Adjectis Simul Speciebus Norvegicis. Hafniae.*
- Mann, D. G. (1990). Rhipid genera. En F. E. Round, R. M. Crawford, & D. G. Mann (Edits.), *The diatoms, biology, and morphology of the genera* (págs. 449-650). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mann, M. E. (2002). Medieval Climatic Optimum. (M. MacCracken, & J. Perry, Edits.) *The Earth System: Physical and Chemical Dimensions of Global Environmental Change*, 1, 514-516.
- Martínez-Yrizar, A., Felger, R. S., y Búrquez, A. (2010). Los ecosistemas terrestres de Sonora: un diverso capital natural. En *Diversidad biológica del estado de Sonora* (págs. 129-156). México DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Meister, F. (1912). *Die Kieselalgen der Schweiz Beiträge zur Kryptogamenflora der Schweiz.*
- Mereschkowsky, C. (1903). Les types de l'endochrome chez les Diatomées. *Scripta Bot. Horti Univers. Imp. Petropol*, 21, 107-193.
- Mereschkowsky, C. (1902). Liste des Diatomées de la Mer Noire. *Scripta Botanica Horti Universitatis Petropolitanae*, 9, 258-276.
- Mojica-Zárate, H. T. (2015). Alternativas productivas para el desarrollo local en Moctezuma, Sonora, México. *Avanzada científica*, 18(1), 1-14.
- Müller, O. (1895). *Rhopalodia* ein neues Genus der Bacillariaceen. (*Engler's Botanische Jahrbucher fur Systematik, Pflanzengeschichte, und Pflanzengeographie*, 22, 54-71.
- Okuno, H. (1975). The fine structure of the frustules of the Bacillariophyta. En J. Tokida, & H. Hirose (Edits.), *Advance of Phycology in Japan* (págs. 97-113). The Hague.
- Paz-Moreno, F. A., Demant, A., Cochemé, J., Dostal, J., y Montigny, R. (2003). The Quaternary Moctezuma volcanic field: A tholeiitic to alkali basaltic episode in the central Sonoran Basin and Range Province, Mexico. En *Tectonic evolution of northwestern Mexico and the Southwestern USA* (Vol. 374, págs. 439-455). Geological Society of America.
- Petersen, J. B. (1938). *Fragilaria intermedia-Synedra vaucheriae*. *Botaniska Notiser* 1938, 1-3, 164-170.

- Pfitzer, E. (1871). *Untersuchungen über Bau und Entwicklung der Bacillariaceen (Diatomaceen)*. *Botanische Abhandlungen aus dem Gebiet der Morphologie und Physiologie*. Herausg. von J. Hanstein, Bonn (Vol. 1).
- Rabenhorst, L. (1853). *Die Süßwasser-Diatomaceen (Bacillarien) für Freunde der Mikroskopie*. Leipzig: Eduard Kummer.
- Rabenhorst, L. (1862). Die Algen Europa's. *Decas*, 127-128.
- Ramírez-García, A. G., Cruz, A., Sánchez, P., y Monterroso, A. (julio-diciembre de 2015). La caracterización morfométrica de la subcuenca del Río Moctezuma, Sonora: ejemplo de aplicación de los sistemas de información geográfica. *Revista de Geografía Agrícola*(55), 27-43.
- Roldán-Quintana, J. (1994). Geología del sur de la Sierra de Oposura, Moctezuma, Estado de Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), 1-10.
- Round, F. E. (1990). Araphid genera. En F. E. Round, R. M. Crawford, & D. G. Mann (Edits.), *The diatoms, biology, and morphology of the genera* (págs. 345-448). Cambridge: Cambridge University Press.
- Round, F. E., Crawford, R. M., y Mann D. G. (1990). *The Diatoms: Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge University Press.
- Saraswati, P. K., y Srinivasan, M. S. (2016). *Micropaleontology: Principles and Applications*. Springer International Publishing Switzerland 2016.
- Schmidt, A. (1874-1959). *Atlas der Diatomaceen-Kunde, von Adolf Schmidt, continued by Martin Schmidt, Friedrich Fricke, Heinrich Heiden, Otto Muller, Friedrich Hustedt*. Königstein: Koeltz Scientific Books.
- Schoeman, F. R. (1969). Diatoms from the Orange Free State (South Africa) and Lesotho. No. 2. *Revista de Biología*, 7(1-2), 35-74.
- Servicio Geológico Mexicano. (2013). *Carta Geológica - Minera Tonibabi H12-D15, a escala 1:50,000*.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2021). *Información de Estaciones Climatológicas: Térapa, Sonora*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Smith, W. (1853). *Synopsis of British Diatomaceae* (Vol. 1). (J. V. Voorst, Ed.) London.
- Smith, W. (1856). *Synopsis of British Diatomaceae* (Vol. 2). (J. V. Voorst, Ed.) London.

- Smol, J. (1990). *Freshwater algae: in Methods in Quaternary Ecology*. Geoscience Canada, Reprint Series.
- Smol, J., & Stoermer, E. (2010). *The diatoms: Applications for the environmental and earth sciences* (2da ed.). Cambridge University Press.
- Spaulding, S., Potapova, M., Bishop, I. W., Lee, S. S., Gasperak, T., Jovanoska, E., Furey, P. C., Edlund, M. B. (2021). *Diatoms of North America*. doi:10.1080/0269249X.2021.2006790
- Stoermer, E. F., Kreis, R. G., and Andresen, N. A. (1999). Checklist of Diatoms from the Laurentian Great Lakes. II. *Journal of Great Lakes Research*, 25(3), 515-566.
- Stoermer, E. F., y Smol, J. (1999). Applications and uses of diatoms: prologue. En *The diatoms: Applications for the environmental and earth sciences* (Segunda ed., págs. 3-10).
- Tobón-Velázquez. (2015). *Reconstrucción paleoclimática del Golfo de Tehuantepec determinado por el registro sedimentario de diatomeas durante el Pleistoceno tardío- Holoceno*. Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F.
- Trinidad-Camarena, J. M. (2019). *Registro paleohidrológico y micropaleontológico de la transición Norgripiano-Megalayano en la Ciénega Tonibabi, Sonora, México*. Tesis de licenciatura, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, Mexico.
- Turpin, P. J. F. (1828). Observations sur le nouveau genre *Surirella*. En *Mémoires du Museum d'Histoire Naturelle* (Vol. 16, págs. 361-368). Paris.
- Valenzuela-Yáñez, M., Yanes-Arwayo, G., Montanez-Armenta, M., Silva-Kurumiya, H., Van Devender, T. (2013). Flora preliminar de Ojo de Agua Tonibabi, Sierra La Madera, Sonora, México. En G. J. Gottfried, P. F. Ffolliott, B. S. Gebow, L. G. Eskew, & L. C. Collins (Ed.), *Fusionando ciencia y gestión en un mundo que cambia rápidamente: Biodiversidad y gestión del Archipiélago Madrean III y VII Conferencia sobre Investigación y Gestión de Recursos en los Desiertos del Sudoeste*, (págs. 500-502). Tucson, Arizona.
- Van Dam, H., Mertens, A. y Sinkeldam, J. (1994). A code checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherland Journal of Aquatic Ecology*, 28(1), 117-133.
- Walker, M., Head, M. J., Berkelhammer, M., Björck, S., Cheng, H., Cwynar, L., Fisher, D., Gkinis, V., Long, A., Lowe, J., Newnham, R., Rasmussen, S. O., Weiss, H. (2018). Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): two new Global Boundary

Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries. *Episodes*, 41(4), 213-223.

- Walker, M., Johnsen, S., Rasmussen, S.O., Steffensen, J.P., Popp, T., Gibbard, P., Hoek, W., Lowe, J., Björck, S., Cwynar, L.C., Hughen, K., Kershaw, P., Kromer, B., Litt, T., Lowe, D.J., Nakagawa, T., Newnham, . (2008). The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period) in the NGRIP ice core. *Episodes*, 31, 264-267.
- Williams, D. M. (2020). Diatom classifications: what purpose do they serve? En G. Cristobal, S. Blanco, & G. Bueno (Edits.), *Modern trends in diatom identification, fundamentals and applications* (págs. 11-24). Springer Nature Switzerland.
- Winter, D., and Bahls, L. (2013). *Encyonema hamsherae*, a new species from the Northern Rocky Mountains, USA. *Phytotaxa*, 127(1), 58-65.
- Zafra-Otero, D. (2017). *El Periodo Cuaternario, Glaciaciones y Humanos*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías Físico Químicas, Colombia.

## APÉNDICE I. Listado taxonómico

Basado en el sistema de clasificación de Round et al. (1990).

Dominio Eukaryota Chatton, 1925

Reino Protista Haeckel, 1866

División Bacillariophyta Engler & Gilg, 1919

Clase Fragilariophyceae (Round) Round et al., 1990

Orden Fragilariales Silva, 1962 emend. in Round et al., 1990

Familia Fragilariaceae Greville, 1833 emend. in Round et al., 1990

Género *Fragilaria* Lyngbye, 1819

*Fragilaria vaucheriae* Petersen, 1938

Género *Stauroforma* F., J. & R., 1996

*Stauroforma exiguiformis* F., J. & R., 1996

Género *Ulnaria* (Compère) Jahn et al., 2001

*Ulnaria ulna* (Compère) Jahn et al., 2001

Clase Bacillariophyceae (Mann) Round et al., 1990

Orden Mastogloiales (Mann) Round et al., 1990

Familia Mastogloiaceae Mereschkowsky, 1903

Género *Mastogloia* (Thwaites) Smith, 1856

*Mastogloia elliptica* (Cleve) Schmidt, 1983

Orden Cymbellales (Mann) Round et al., 1990

Familia Anomoeoneidaceae (Mann) Round et al., 1990

Género *Anomoeoneis* Pfitzer, 1871

*Anomoeoneis sphaerophora* Pfitzer, 1871

Familia Cymbellaceae Greville, 1833 emend. in Round et al., 1990

Género *Encyonema* Kützing, 1833

*Encyonema hamsherae* Winter & Bahls, 2013

*Encyonema minutum* (Hilse) Rabenhorst, 1862

Familia Gomphonemataceae Kützing, 1844

Género *Gomphonema* Ehrenberg, 1832

*Gomphonema gracile* Ehrenberg, 1838

*Gomphonema parvulum* Kützing, 1849

Género *Gomphonella* Rabenhorst, 1853

*Gomphonella olivacea* Rabenhorst, 1853

Orden Achnanthes Silva, 1962 emend. in Round et al., 1990

Familia Achnanthes Kützing, 1844

Género *Achnanthes* Bory, 1927

*Achnanthes stolidia* Krasske, 1949

Género *Planotidium* Lange-Bertalot, 1999

*Planotidium lanceolatum* Lange-Bertalot, 1999



- Navicula recens Krammer & Large-Bertalot, 1985
- Navicula rhynchocephala Ehrenberg, 1844
- Navicula tenelloides Hustedt, 1937
- Género Navicymbula Krammer, 2003
  - Navicymbula pusilla (Grunow in Schmidt) Kramer, 2003
- Género Pinnunavis Okuno, 1975
  - Pinnunavis elegans Smith, 1853
- Orden Thalassiophysales (Mann) Round et al., 1990
  - Familia Catenulaceae Mereschkowsky, 1902
    - Género Halamphora Mereschkowsky, 1903
      - Halamphora veneta (Kützing) Levkov, 2009
- Orden Bacillariales Hendey, 1937
  - Familia Bacillariaceae Ehrenberg, 1831
    - Género Hantzschia Grunow, 1877
      - Hantzschia amphioxys (Ehrenberg) Grunow, 1877
    - Género Trybionella Smith, 1853
      - Trybionella apiculata Gregory, 1857
    - Género Nitzschia Hassall, 1845
      - Nitzschia amphibia Grunow, 1862
      - Nitzschia capitellata Hustedt, 1945
      - Nitzschia linearis Smith, 1853
      - Nitzschia lorenziana Grunow, 1879 emend. in Lam & Ho 1988
      - Nitzschia palea Smith, 1856
    - Género Denticula Kützing, 1844
      - Denticula elegans Kützing, 1844
- Orden Rhopalodiales (Mann) Round et al., 1990
  - Familia Rhopalodiaceae (Karsten) emend. in Round et al., 1990
    - Género Epithemia (Brébisson) Kützing, 1844
      - Epithemia adnata Brébisson, 1838
      - Epithemia gibberula (Ehrenberg) Kützing, 1844
    - Género Rhopalodia Müller, 1895
      - Rhopalodia acuminata Lange-Bertalot & Krammer, 1987
- Orden Surirellales Mann in Round et al., 1990
  - Familia Surirellaceae Kützing, 1844
    - Género Surirella Turpin, 1828
      - Surirella capronii Brébisson & Kitton, 1869 emend. in Hällfors, 2004
      - Surirella librile Ehrenberg, 1845

## APÉNDICE II. Láminas de diatomeas fósiles

(la escala equivale a 10  $\mu\text{m}$ )

- Figura 1. *Achnanthes stolidia* (longitud 6  $\mu\text{m}$ )  
Figura 2. *Achnanthidium minutissimum* (longitud 8  $\mu\text{m}$ )  
Figura 3. *Anomoeoneis sphaerophora* (longitud 36  $\mu\text{m}$ )  
Figura 4. *Caloneis clevei* (longitud 17  $\mu\text{m}$ )  
Figura 5. *Caloneis molaris* (longitud 60  $\mu\text{m}$ )  
Figura 6. *Caloneis silicula* (longitud 30  $\mu\text{m}$ )  
Figura 7. *Caloneis undosa* (longitud 19  $\mu\text{m}$ )  
Figura 8. *Cocconeis placentula* (longitud 12  $\mu\text{m}$ )  
Figura 9. *Denticula elegans* (vista valvar) (longitud 21  $\mu\text{m}$ )  
Figura 10. *Denticula elegans* (vista cingular)  
Figura 11. *Diploneis elliptica* (longitud 40  $\mu\text{m}$ )  
Figura 12. *Encyonema hamsherae* (longitud 19  $\mu\text{m}$ )  
Figura 13. *Encyonema minutum* (longitud 15  $\mu\text{m}$ )

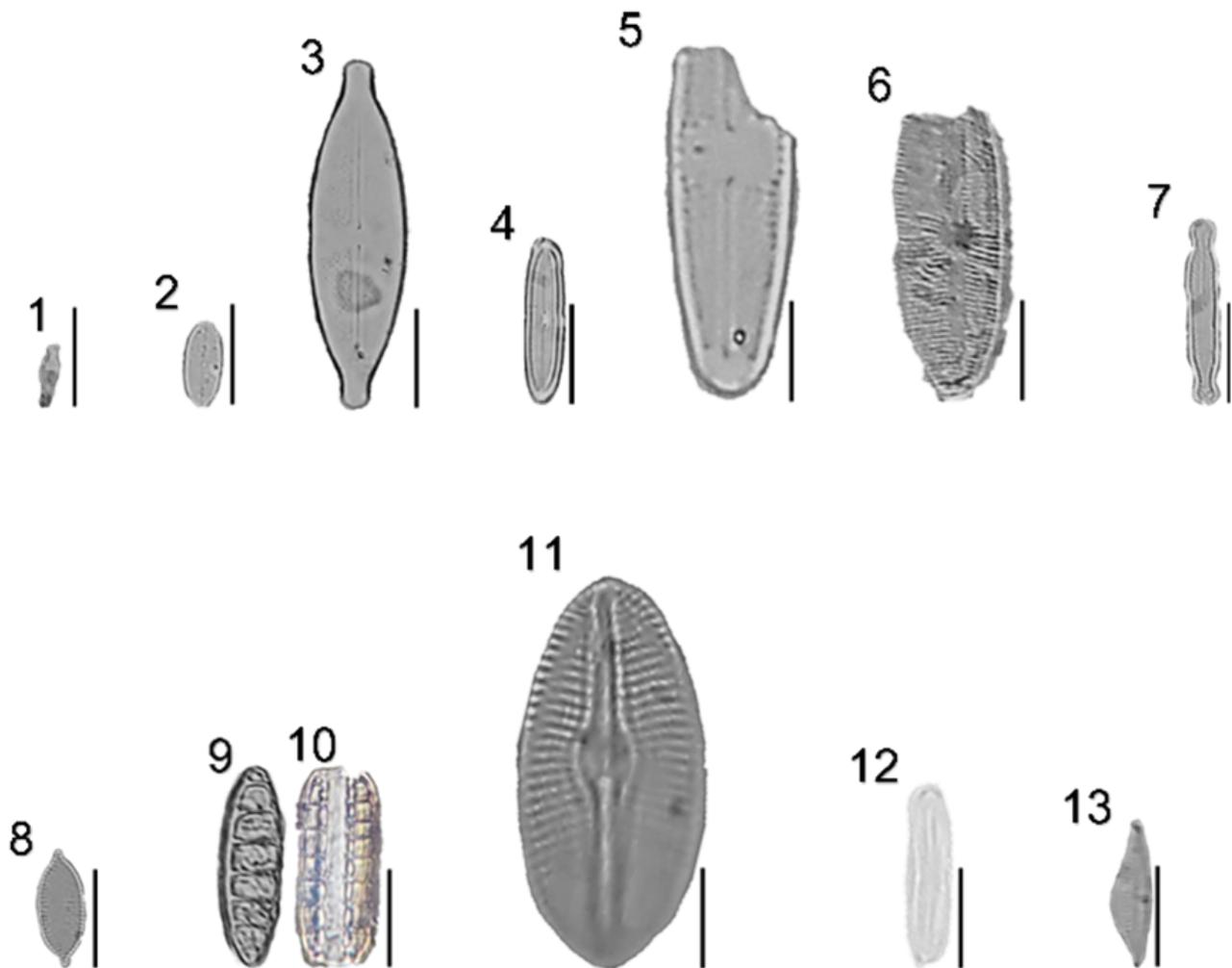


Figura 14. *Epithemia adnata* (vista valvar) (longitud 49  $\mu\text{m}$ )

Figura 15. *Epithemia adnata* (vista cingular)

Figura 16. *Epithemia gibberula* (longitud 30  $\mu\text{m}$ )

Figura 17. *Eucoconeis laevis* (longitud 10  $\mu\text{m}$ )

Figura 18. *Fragilaria vaucheriae* (longitud 6  $\mu\text{m}$ )

Figura 19. *Gogorevia exilis* (longitud 14  $\mu\text{m}$ )

Figura 20. *Gomphonella olivacea* (longitud 32  $\mu\text{m}$ )

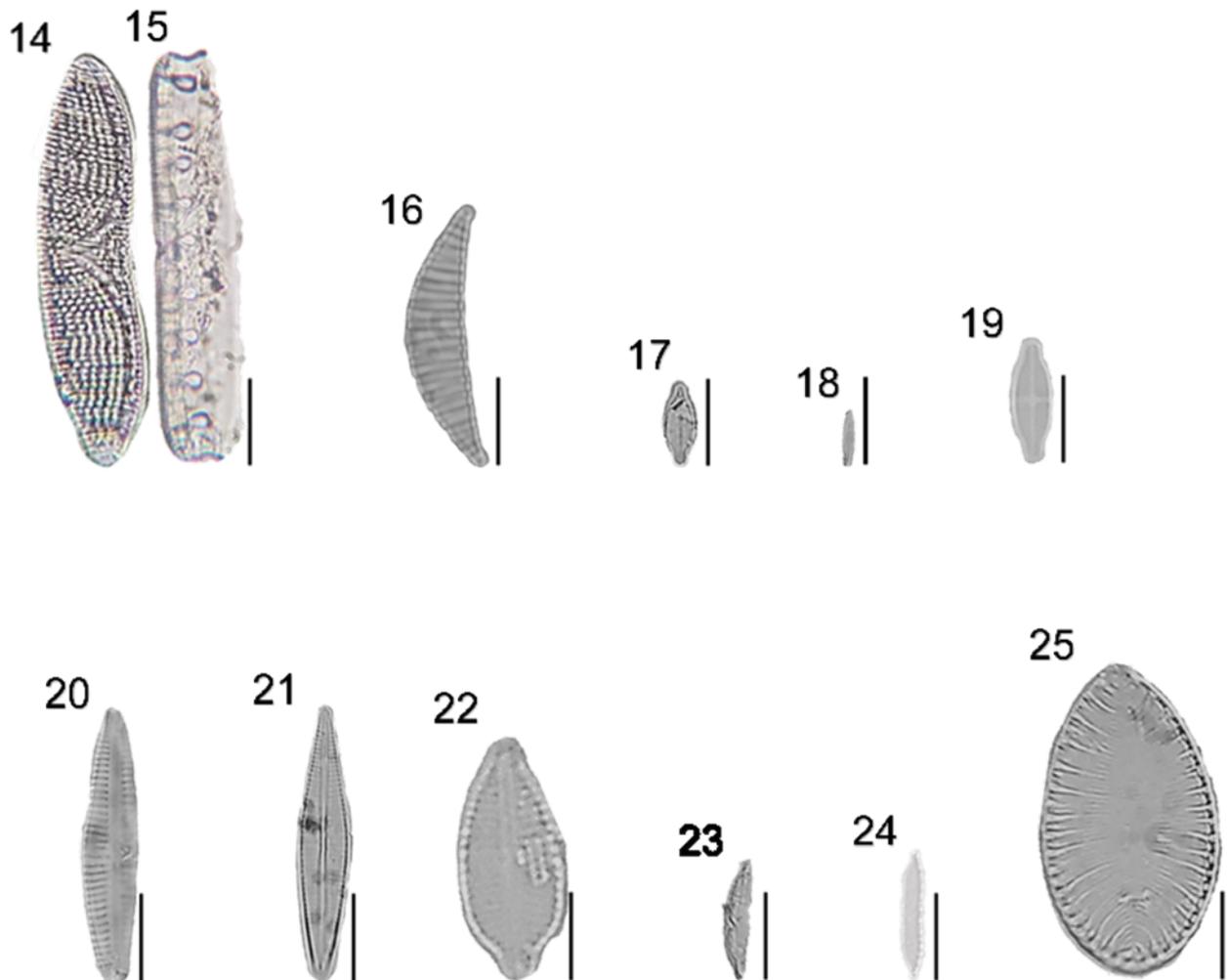
Figura 21. *Gomphonema gracile* (longitud 32  $\mu\text{m}$ )

Figura 22. *Gomphonema parvulum* (longitud 28  $\mu\text{m}$ )

Figura 23. *Halampora veneta* (longitud 14  $\mu\text{m}$ )

Figura 24. *Hantzschia amphioxys* (longitud 60  $\mu\text{m}$ )

Figura 25. *Surirella capronii* (longitud 37  $\mu\text{m}$ )



- Figura 26. *Mastogloia elliptica* (longitud 37  $\mu\text{m}$ )  
Figura 27. *Navicula rhynchocephala* (longitud 48  $\mu\text{m}$ )  
Figura 28. *Navicula cari* (longitud 9  $\mu\text{m}$ )  
Figura 29. *Navicula digitoradiata* (longitud 32  $\mu\text{m}$ )  
Figura 30. *Navicula libonensis* (longitud 19  $\mu\text{m}$ )  
Figura 31. *Navicula radiosa* (longitud 17  $\mu\text{m}$ )  
Figura 32. *Navicula recens* (longitud 52  $\mu\text{m}$ )  
Figura 33. *Navicymbula pusilla* (longitud 16  $\mu\text{m}$ )  
Figura 34. *Neidium ladogensis* (longitud 30  $\mu\text{m}$ )  
Figura 35. *Nitzschia amphibia* (longitud 15  $\mu\text{m}$ )  
Figura 36. *Nitzschia capitellata* (longitud 32  $\mu\text{m}$ )

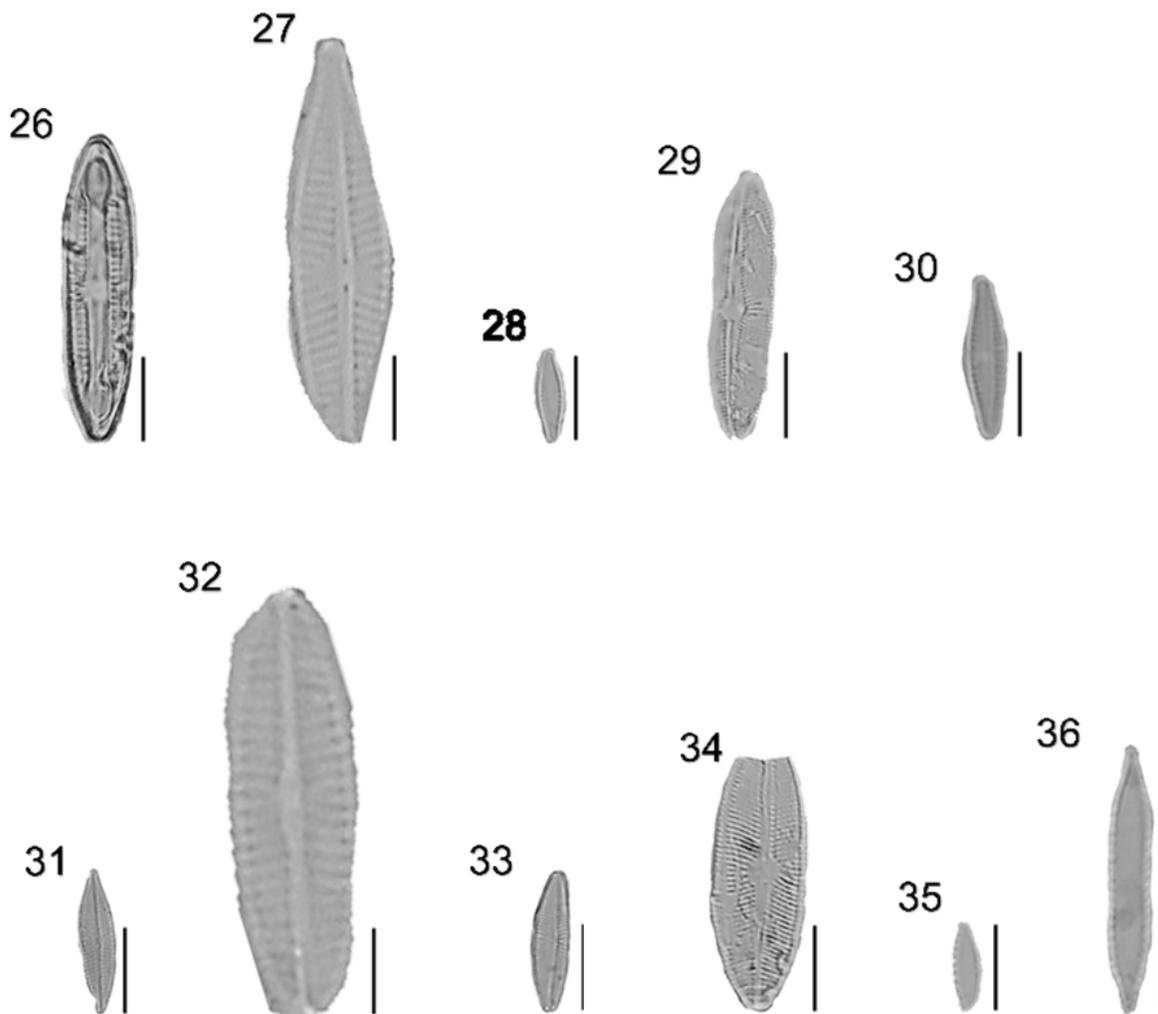


Figura 37. *Nitzschia lorenziana* (longitud 49  $\mu\text{m}$ )

Figura 38. *Nitzschia linearis* (longitud 61  $\mu\text{m}$ )

Figura 39. *Nitzschia palea* (longitud 12  $\mu\text{m}$ )

Figura 40. *Pinnularia major* (longitud 139  $\mu\text{m}$ )

Figura 41. *Pinnularia microstauron* (longitud 20  $\mu\text{m}$ )

Figura 42. *Pinnularia viridis* (longitud 98  $\mu\text{m}$ )

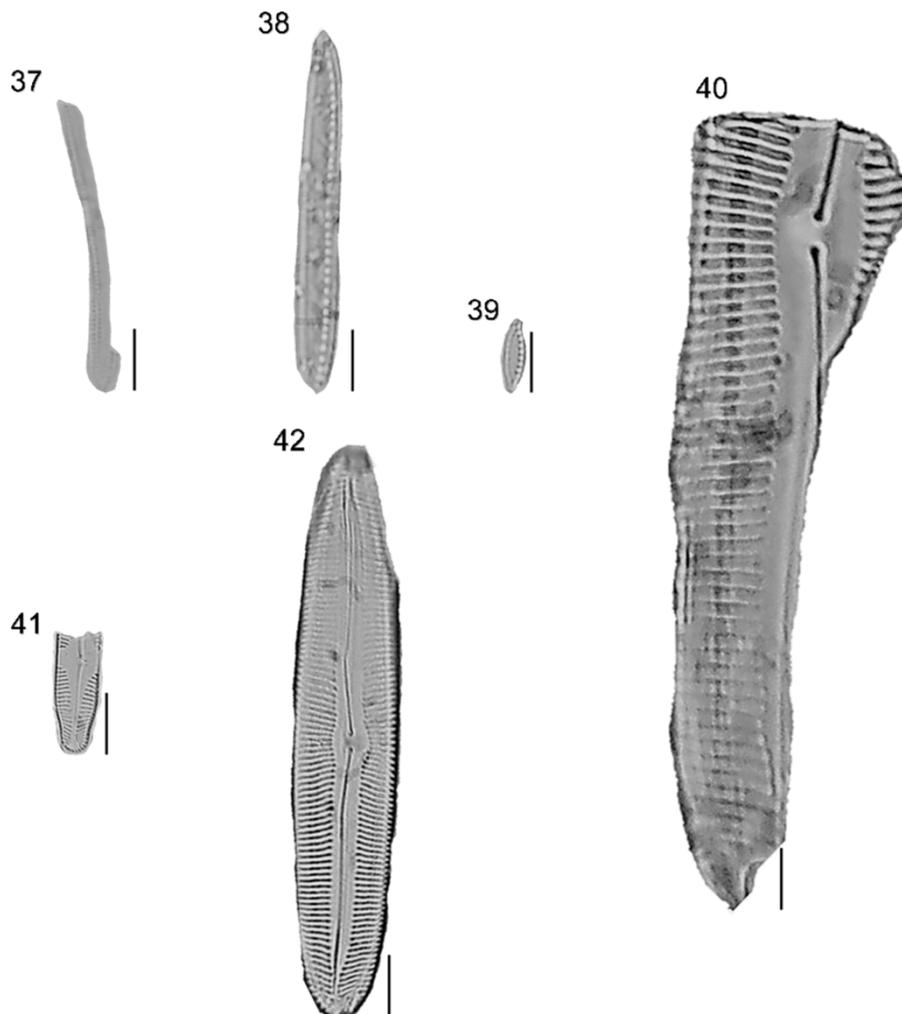


Figura 43. *Pinnunavis elegans* (longitud 30  $\mu\text{m}$ )

Figura 44. *Planothidium lanceolatum* (longitud 9  $\mu\text{m}$ )

Figura 45. *Rhopalodia acuminata* (longitud 11  $\mu\text{m}$ )

Figura 46. *Sellaphora pupula* (longitud 16  $\mu\text{m}$ )

Figura 47. *Staurosira construens* (longitud 15  $\mu\text{m}$ )

Figura 48. *Surirella librile* (longitud 26  $\mu\text{m}$ )

Figura 49. *Tryblionella apiculata* (longitud 18  $\mu\text{m}$ )

Figura 50. *Ulnaria ulna* (longitud 48  $\mu\text{m}$ )

