



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y
NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**RECONSTRUCCIÓN PALEOAMBIENTAL
EN LA LAGUNA LA CRUZ A TRAVÉS DEL
REGISTRO SEDIMENTARIO DE
DIATOMEAS DESDE LA PEQUEÑA EDAD
DE HIELO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

GEÓLOGO

PRESENTA:

DIEGO ESTEBAN MOLINA BECERRA



HERMOSILLO, SONORA, DICIEMBRE 2018

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, 16 de agosto de 2018

DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
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 paleoambiental en la laguna La Cruz a través del registro sedimentario de diatomeas desde la Pequeña Edad de Hielo”

Esto es con el fin de que el alumno **Diego Esteban Molina Becerra** con Expediente No. **213203711**, 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.

ATENTAMENTE
“EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA”


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

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora, 06 de septiembre, 2018

M.C. 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:

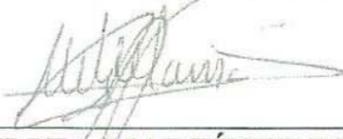
“RECONSTRUCCIÓN PALEOAMBIENTAL EN LA LAGUNA LA CRUZ A TRAVÉS DEL REGISTRO SEDIMENTARIO DE DIATOMEAS DESDE LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO”

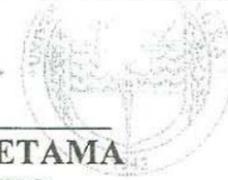
Esto es con el fin de que el alumno: **Diego Esteban Molina Becerra** con **Expediente No. 213203711**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo les comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

Presidente	Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Secretario	Dra. María Cristina Peñalba Garmendia
Vocal	M. C. Iván Rosario Espinoza Encinas

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

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


DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO.



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA

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



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

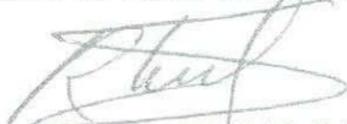
NOMBRE DE LA TESIS:

"RECONSTRUCCIÓN PALEOAMBIENTAL EN LA LAGUNA LA CRUZ A TRAVÉS DEL REGISTRO
SEDIMENTARIO DE DIATOMEAS DESDE LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO"

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

DIEGO ESTEBAN MOLINA BECERRA

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


DR. ROGELIO MONREAL SAAVEDRA

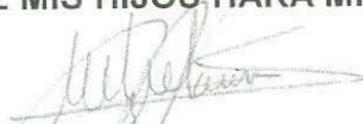
La que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.


DRA. MARÍA CRISTINA PEÑALBA GARMENDIA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis 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"


DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO

C.c.p. Archivo.

DEDICATORIA

A mis grandiosos padres, Diego y Aurelia,

A mis queridas abuelas, Altagracia y Teófila,

A mi hermana y a mi querida sobrina, Claudia y Marianeth.

A estas personas tan importantes para mí, por ser los pilares más grandes en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, y a sus profesores, por brindarme una formación tanto académica como personal, y por proporcionarme los medios para la realización de este trabajo.

Al M.C. Iván Espinoza, por la paciencia, el apoyo y todos los consejos durante la realización de este trabajo. Agradezco las horas de enseñanza sobre diatomeas. Son pocas palabras; sin embargo, no son suficientes. Muchas gracias por todo.

A la Dra. María Cristina Peñalba Garmendia, por haberme brindado un espacio donde trabajar, y por sus consejos durante la revisión y el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Rogelio Monreal Saavedra, por sus consejos y el tiempo dedicado en la revisión de este trabajo.

A mis padres, Aurelia y Diego, porque sin el apoyo de ustedes no hubiera sido posible sostenerme emocionalmente estando lejos de ustedes, les doy gracias por los consejos que me dieron en los momentos difíciles y por los sacrificios que han realizado por mí, no me queda más que decirles muchas gracias, me hacen sentir orgulloso de ser su hijo.

A mis compañeros y amigos de la generación 2013-2018 de la Licenciatura en Geología, por haber hecho más placentera esta etapa, fue y será un placer siempre el haber compartido con ustedes este tiempo.

A mis amigos, Rogelio Galindo, Fernando Lucero, Armando Verdugo y Francisco Martínez Pérez, a ustedes por haber estado durante toda la carrera, por su apoyo y por los momentos en los que convivimos, sin ustedes la carrera no hubiera sido la misma durante estos años.

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
RESUMEN	v
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ÁREA DE ESTUDIO	2
2.1 Localización	2
2.2 Geología y geomorfología	3
2.3 Clima y vegetación	3
III. ANTECEDENTES	5
3.1 Período Cuaternario	5
3.1.2 El evento 2.8 ka	6
3.1.1 La Pequeña Edad de Hielo	7
3.2 Registros paleoambientales en Bahía de Kino	8
3.3 Diatomeas y ambientes	11
IV. JUSTIFICACIÓN	15
V. HIPÓTESIS	16
VI. OBJETIVO	17
6.1 Objetivo general.....	17
6.2 Objetivos específicos	17
VII. MATERIALES Y MÉTODOS	18
7.1 Muestreo del núcleo	18
7.2 Análisis geoquímico	20
7.3 Análisis de diatomeas	21
7.4 Tratamiento estadístico	24
VIII. RESULTADOS	25
8.1 Análisis geoquímico	25
8.2 Análisis de diatomeas	29
8.3 Análisis estadístico	34

IX. DISCUSIÓN	36
9.1 Reconstrucción paleoambiental	36
9.2 Indicadores paleoecológicos	38
9.3 Reconstrucción paleoambiental	39
X. CONCLUSIONES	42
Literatura citada	43
Apéndice I. Concentración de elementos en el núcleo UEK	50
Apéndice II. Listado taxonómico	51
Apéndice III. Ecología de diatomeas.....	57
Apéndice IV. Láminas de diatomeas.....	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fechamientos de radiocarbono del núcleo UEK	10
Tabla 2. Muestras seleccionadas para el análisis geoquímico	20
Tabla 3. Muestras seleccionadas para el análisis de diatomeas	21
Tabla 4. Espectro de salinidad	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.	2
Figura 2. El periodo Cuaternario y sus subdivisiones	5
Figura 3. Columna estratigráfica del núcleo UEK, Laguna La Cruz, Sonora, México.....	9
Figura 4. Modelo de edad para el núcleo UEK, Laguna La Cruz, Sonora, México.....	10
Figura 5. Morfología general de las diatomeas	11
Figura 6. Ornamentación de las valvas de diatomeas.....	12
Figura 7. Ciclo de reproducción asexual de las diatomeas y reproducción sexual	13
Figura 8. Localización del sitio de muestreo	18
Figura 9. Extracción del núcleo de sedimentos en la Laguna La Cruz, Sonora, México....	19
Figura 10 Núcleo UEK, Laguna La Cruz, Sonora, México	19
Figura 11. Equipo utilizado durante el análisis de diatomeas.	22
Figura 12. Estratigrafía y concentración de Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Sr y Ti	26
Figura 13. Índice de Alteración Química en el núcleo UEK.....	27
Figura 14. Gráficos de dispersión de cada elemento vs CIA	28
Figura 15. Diagrama de diatomeas	32
Figura 16. Análisis de correspondencia sin tendencia para variables estudiadas	34
Figura 17. Análisis de correspondencia sin tendencia para muestras estudiadas.....	36
Figura 18. Reconstrucción de ambientes pasado de la Laguna La Cruz	38
Figura 19. Fases ambientales de la Laguna La Cruz durante los últimos 2,800 años	42

RESUMEN

En la zona litoral de La Laguna la Cruz se realizó una extracción de un núcleo de sedimentos con una profundidad de dos metros, con el fin de reconstruir el pasado ambiental reciente de la zona. Los métodos que fueron utilizados involucran un análisis geoquímico, estadístico y de preservación de diatomeas durante los últimos 2,800 años, aproximadamente. En los resultados del análisis de diatomeas se identificaron 70 taxones, siendo *Paralia sulcata*, *Dimmeragramma minor* y *Nitzschia granulata* las más abundantes. En base a sus características ecológicas, las diatomeas fueron clasificadas como euhalobias/polihalobias, mesohalobias y oligohalobias, siendo estas últimas de gran importancia para este estudio por indicar la entrada de agua dulce a la laguna. El dominio de *Paralia Sulcata* a lo largo de la secuencia indica que ha prevalecido un lagunar costero durante el intervalo de tiempo estudiado, la presencia de *Cocconeis disculus* y *Fragilaria crotonensis* indican los periodos en los que arroyos descargaron agua dulce a la laguna, mientras que la presencia de *Thalassiosira eccentrica* sugiere que la laguna ha incrementado su profundidad durante los últimos años. En los registros geoquímicos, el Índice de Alteración Química y el índice de esorrentía se asocian con la presencia de diatomeas de agua dulce, infiriéndose condiciones de mayor humedad ambiental, mientras que el índice de salinidad se asocia con el incremento de diatomeas marinas, y por lo tanto la disminución de entrada de agua dulce a la laguna. La correlación de los resultados de los análisis sugiere que la laguna presentó cinco fases ambientales durante los últimos 2,800 años, siendo la variación en la salinidad y la profundidad de la laguna sus principales cambios durante este periodo.

Palabras clave: Diatomeas, Geoquímica, Ambientes, Holoceno, Sonora.

I. INTRODUCCIÓN

Los cambios climáticos ocurridos durante el Cuaternario llevaron a la Tierra a experimentar repetidos ciclos glaciales e interglaciales. Los mayores efectos se produjeron en latitudes medias y altas, donde las capas de hielo avanzaban y retrocedían, mientras que en latitudes bajas se alternaban periodos de aridez con periodos de mayor precipitación (Lowe y Walker, 2015). En todo el planeta, las tasas de intemperismo de las rocas variaban con los cambios de temperatura y precipitación, el nivel del mar variaba con los cambios en las masas de los glaciares, las poblaciones de plantas y animales se vieron obligadas a migrar y adaptarse en respuesta a los cambios ambientales (Metcalfe y Nash, 2012; Lowe y Walker, 2015).

Para todo organismo, las características climáticas y ambientales juegan un papel importante dentro de su ciclo de vida, las variaciones en estas condiciones provocan que las comunidades de organismos se modifiquen según las preferencias ecológicas de cada especie (Jordan y Stickley, 2010). Por esta razón, microfósiles como cocolitofóridos, diatomeas, foraminíferos, ostrácodos, polen y radiolarios han sido empleados en la reconstrucción e interpretación de ambientes cuaternarios (Lowe y Walker, 2015).

Las diatomeas han demostrado ser extremadamente útiles como indicadores de cambios ambientales cuaternarios, particularmente en sedimentos lacustres, pero también en secuencias marinas someras y profundas (Lowe y Walker, 2015). La gran abundancia que estos microfósiles pueden alcanzar en los sedimentos, permite realizar la reconstrucción de los cambios en el nivel de un lago, de las variaciones en la química del agua, de los cambios en el nivel del mar y la perturbación de los ecosistemas por actividad humana (Smol y Stoermer, 2010).

En el presente estudio se lleva a cabo la reconstrucción de ambientes en la Laguna La Cruz (Sonora, México), durante los últimos 2748 años, a partir del análisis de diatomeas fósiles y geoquímica. Los resultados de los análisis son correlacionados por métodos estadísticos para definir las características de los ambientes pasados en la Laguna La Cruz.

II. ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Localización

La Laguna La Cruz se localiza en la región noroeste de México, en la costa este del Golfo de California, en el estado de Sonora, municipio de Hermosillo, al sur del pueblo de Bahía de Kino (Figura 1), entre las coordenadas geográficas $28^{\circ}55'$ y $28^{\circ}40'$ Norte y $112^{\circ}03'$ y $111^{\circ}50'$ Oeste, con una altura media de 2 m sobre el nivel del mar (De la O Villanueva y Villalba Atondo, 1984; Meltzer et al., 2012).

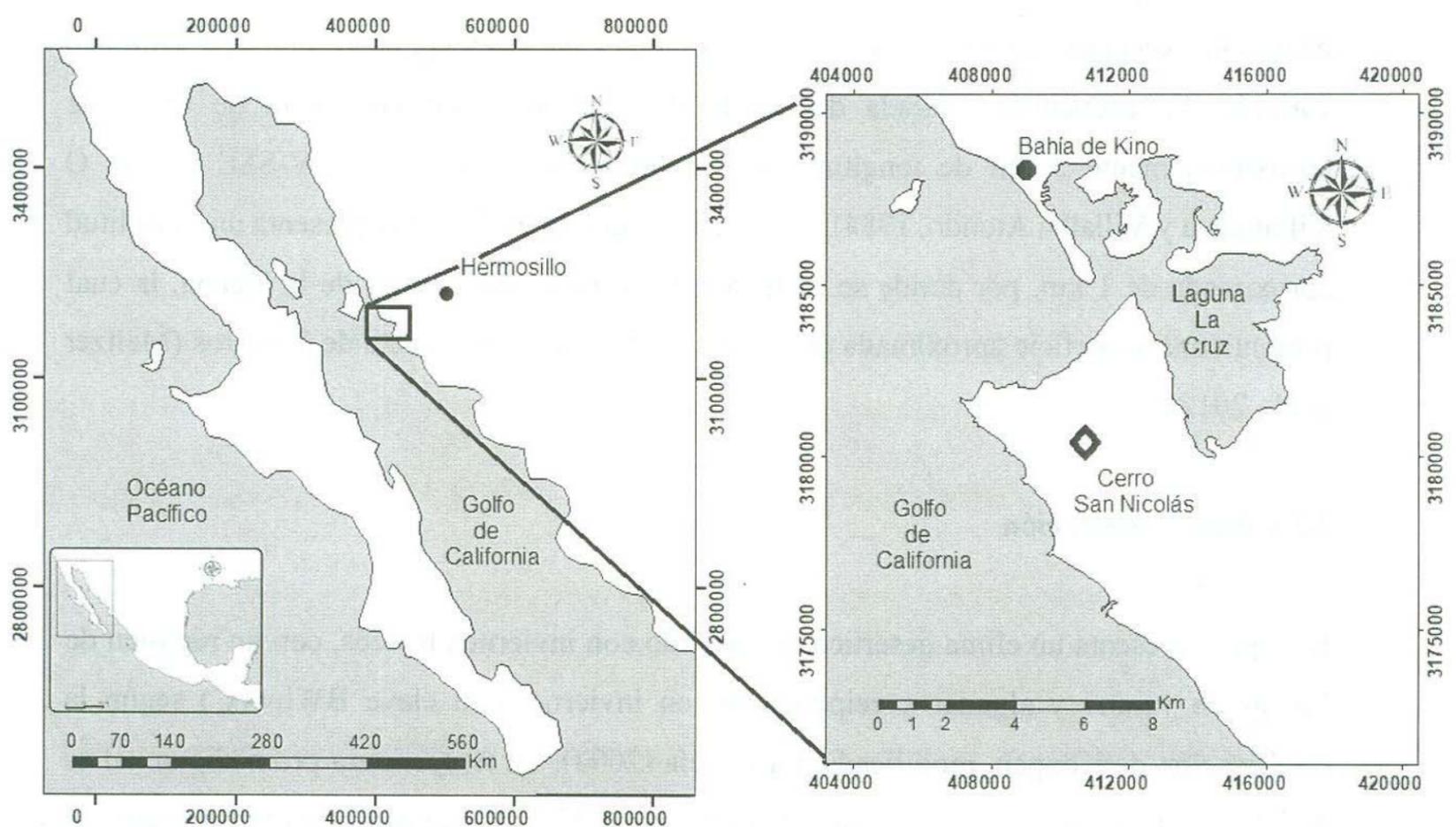


Figura 1. Localización del área de estudio.

La Laguna La Cruz se localiza en límite del Desierto Sonorense con el Golfo de California (Brusca et al., 2006). En sus alrededores dominan especies del Desierto Sonorense como chamizo (*Atriplex canescens*), Choya (*Cylindropuntia fulgida*), gobernadora (*Larrea tridentata*), mezquite (*Prosopis glandulosa*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), palo fierro (*Olneya tesota*), palo verde (*Parkinsonia microphylla*), pitahaya (*Stenocereus thurberi*), Sahuaro (*Carnegiea gigantea*), torote blanco (*Bursera microphylla*) y uña de gato (*Acacia greggii*), según el inventario de especies de la Red de Herbarios del Noroeste de México (2018). La vegetación característica de la laguna es el manglar (*Avicennia germinans* y *Rhizophora mangle*), acompañado por especies de las familias Aizoaceae, Amaranthaceae, Bataceae y Frankeniaceae (Hannah, 2008).

2.2 Geología y geomorfología

La geología del área de estudio está constituida por dos unidades principales. La más antigua de ellas aflora en el Cerro San Nicolás, al suroeste de la Laguna La Cruz (Figura 1); esta representada por un intrusivo cretácico de composición granítico-granodiorítico (Servicio Geológico Mexicano, 2000; Monreal et al., 2001). La segunda unidad está constituida por sedimentos cuaternarios (gravas, arenas y limos) depositados en valles, laderas y planicies, alrededor de la laguna (Monreal et al., 2001).

Según la clasificación de Lankford (1977), la Laguna La Cruz es una laguna costera tipo III, caracterizada por estar protegida del mar abierto por una barrera, tener energía relativamente baja, con excepción de los canales y en condiciones de tormenta, así como una salinidad variable. Se encuentra separada del Golfo de California por una barra de arena de aproximadamente 3 km de longitud, extendiéndose en dirección NNW-SSE (De la O Villanueva y Villalba Atondo, 1984). La “boca” de la Laguna La Cruz presenta una amplitud aproximada de 1 km, por donde se extienden los canales principales de la laguna, la cual presenta una superficie aproximada de 66.652 km² y una profundidad de 2 metros (Meltzer et al., 2012).

2.3 Clima y vegetación

La región presenta un clima desértico, semicálido con inviernos frescos, con un régimen de lluvias en verano y algunas precipitaciones en invierno, con clave BWhw(x') según la clasificación de Köppen, modificada por García (2004). La temperatura promedio anual es de 20.3 °C, con una temperatura máxima mensual de 37.4 °C (julio) y una mínima mensual de 22.1 °C (junio) en verano, una temperatura máxima mensual de 22.8 °C (marzo) y una mínima mensual de 4.7 °C (enero) en invierno (Servicio Meteorológico Nacional, 2018). La precipitación anual es de 161.3 mm, siendo agosto el mes con mayor precipitación y mayo el mes con menor precipitación (Servicio Meteorológico Nacional, 2018).

III. ANTECEDENTES

3.1 Periodo Cuaternario

El Cuaternario es el periodo más reciente del registro geológico (Figura 2), junto con el Paleógeno y el Neógeno forman el Cenozoico (Lowe y Walker, 2015), la tercer era del Fanerozoico. El periodo Cuaternario comprende los últimos 2.58 millones de años (Ma) y se divide en dos épocas, el Pleistoceno (2.58 a 0.0117 Ma) y el Holoceno (0.0117 Ma hasta la actualidad), según la Comisión Internacional de Estratigrafía (Cohen et al., 2018).

Una de las características más distintivas del Cuaternario ha sido la actividad periódica de los glaciares durante los periodos fríos, con la acumulación de grandes capas de hielo continentales y la expansión de los glaciares de montaña en muchas partes del mundo (Lowe y Walker, 2015). Estos episodios fríos (también llamados glaciales) fueron intercalados por episodios cálidos (o interglaciales), durante los cuales las temperaturas en las regiones de latitudes medias fueron ocasionalmente más altas que las actuales (Lowe y Walker, 2015).

Eonolema / Eón		Eratema / Era		Sistema / Período		Edad (Ma)
		Serie / Época		Piso / Edad		
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Megalayano		actualidad
				Norgripiano		0.0042
				Groenlandiano		0.0082
			Pleistoceno	Tardío		0.0117
				Medio		0.126
				Calabriano		0.781
				Gelasiano		1.80
						2.58

Figura 2. El periodo Cuaternario y sus subdivisiones (Cohen et al., 2013).

El más reciente episodio interglacial recibe el nombre de Holoceno, mejor conocido como la segunda época del Cuaternario (Figura 2). El Holoceno es dividido por la Comisión Internacional de Estratigrafía en tres edades: Groenlandiano, Norgripiano y Megalayano (Cohen et al., 2013). El Groenlandiano (11,700 a 8,200 años) está definido por cambios climáticos globales registrados por marcadores isotópicos en núcleos de hielo extraídos en el centro de Groenlandia, el Norgripiano (8,200 a 4,200 años) está definido por los registros isotópicos de un núcleo de hielo extraído en el norte de Groenlandia, y el Megalayano (últimos 4,200 años antes de 1,950) está definido por un espeleotema (Formación de cavidades) colectado de la Cueva Mawmluh, al norte de India (Cohen et al., 2013).

El Megalayano, al igual que el resto del Holoceno y el Cuaternario, ha experimentado importantes cambios climáticos, como la aridificación de las latitudes medias y bajas durante la transición del Norgripiano al Megalayano hace 4,200 años antes del presente (AP), el cambio abrupto hacia condiciones más frías y húmedas en Europa hace aproximadamente 2,800 años calibrados (cal.) AP, y la Pequeña Edad de Hielo ocurrida entre los años 1,300 y 1,850 (Lowe y Walker, 2015).

3.1.1 El evento 2.8 ka

Un cambio climático abrupto, marcado por condiciones más frías y húmedas, observado en registros arqueológicos y paleoclimáticos de Europa (Barber et al., 2004; Charman et al., 2006; Swindles et al., 2007), Siberia (Van Geel et al., 2004) y Sudamérica (Chambers et al., 2007) comienza alrededor de 2,800 años cal. AP. El principal factor que impulsó este cambio climático fue la reducción de la actividad solar (Bond et al., 2001). Las evidencias en las condiciones climáticas registradas en ambos hemisferios, junto con los registros que indican un aumento en la producción de ^{10}Be y ^{14}C (Knudsen et al., 2009), los cuales se obtienen en momentos de menor actividad solar (Lowe y Walker, 2015), proporcionan una fuerte evidencia para la hipótesis de que el cambio climático ocurrido hace 2,800 años cal. AP es impulsado por un forzamiento solar (Lowe y Walker, 2015).

3.1.2 La Pequeña Edad de Hielo

De los eventos climáticos holocenos, ninguno ha atraído más la atención que la Pequeña Edad de Hielo, el intervalo de frío efímero ocurrido particularmente en el norte de Europa desde aproximadamente del siglo XVI hasta el siglo XIX (Lowe y Walker, 2015). En las áreas alpinas, los glaciares se aceleraron, en algunos casos los glaciares avanzaron, bajando en altitud, las heladas destruyeron cosechas y la hambruna resultante fue generalizada, mientras que el hielo marino expandido interrumpió las comunicaciones costeras y pesqueras (Grove, 1988; Fagan, 2000). Sin embargo, cuando se ve a escala global, la Pequeña Edad de Hielo parece haber sido un enfriamiento relativamente modesto en el hemisferio norte, con una disminución general de la temperatura de menos de 1 °C, en relación con los niveles de finales del siglo XX (Lowe y Walker, 2015). Por otro lado, estos valores generalizados ocultan considerables diferencias regionales y temporales (Crowley y Lowery, 2000).

En Europa, los periodos más fríos parecen haber ocurrido en el siglo XVIII, con temperaturas en algunas regiones de 2 °C por debajo de los niveles del siglo XX, mientras que en Norteamérica las décadas más frías fueron durante el siglo XIX y estuvieron cerca de 1.5 °C más frías (Mann et al., 1998).

En el hemisferio sur, las evidencias sugieren un enfriamiento climático ampliamente coincidente con las ocurridas durante la Pequeña Edad de Hielo en el hemisferio norte (Lowe y Walker, 2015). Por ejemplo, en Nueva Zelanda hay evidencias de avances glaciares durante el siglo XVIII (Winkler, 2000); registros de perforaciones en Australia sugieren que el siglo XVII fue el más frío de los últimos 500 años (Pollack et al., 2006); datos espeleológicos en Sudáfrica apuntan a un período frío entre los siglos XVI y XIX (Holmgren et al., 2001); mientras que los datos de isótopos estables de un núcleo de hielo costero de la Antártida indican que el área experimentó temperaturas promedio más frías de 1.6 a 1.4 °C antes del año 1,850 en comparación con los últimos 150 años (Rhodes et al., 2012).

La explicación más probable para el desarrollo de la Pequeña Edad de Hielo parece estar relacionada al cambio climático debido a la actividad solar o volcánica (Grove, 1988). Se

sabe desde hace mucho tiempo que dos episodios significativos de actividad de manchas solares reducidas ocurrieron durante este periodo, el Mínimo Maunder entre 1,645 y 1,715, y el de Dalton entre 1790-1830, y estos están bien representados en los registros de radionúclidos de ^{14}C y ^{10}Be en anillos de árboles y núcleos de hielo (Steinhilber et al., 2012). Una segunda hipótesis involucra la actividad volcánica, durante la cual grandes cantidades de ceniza y azufre son expulsadas a la atmósfera, la nube de ceniza bloquea los rayos solares, mientras que el azufre interactúa con los agentes atmosféricos para crear ácido sulfúrico, eliminando la radiación solar entrante al diseminarse globalmente (Oppenheimer, 2011).

3.2 Registros paleoambientales en Bahía de Kino

En el sitio denominado Salina Kino Nuevo, localizado al este de Bahía de Kino, Caballero et al. (2005) realizaron un estudio paleoambiental en un núcleo de 10 m de longitud, utilizando diatomeas, foraminíferos, ostrácodos, polen y susceptibilidad magnética. Este estudio propone que hace aproximadamente 6,600 años cal. AP predominaba en el área un ambiente pantanoso, el cual tenía un aporte constante de agua dulce. Entre 6,350 y 6,250 años cal. AP el aumento del nivel del mar permitió el desarrollo de una laguna costera, alrededor de 5,900 años cal. AP la boca de la laguna se encontraba cercana al sitio de estudio, condiciones que prevalecieron hasta la formación del cordón de dunas que actualmente separa la Salina Kino Nuevo del mar (Caballero et al., 2005).

En la Laguna La Cruz, Galindo – Quijada (2018) realizó un estudio de la granulometría y el contenido de metales pesados, carbono orgánico e inorgánico de un núcleo de 2 m de longitud (denominado por el autor como núcleo UEK). Este estudio sugiere que las condiciones ambientales en la laguna han prevalecido sin cambios importantes desde hace aproximadamente 2,800 años cal. AP.

La columna estratigráfica del núcleo UEK (Figura 3), muestra una sedimentación dominada por arena limosa, cuya mayor proporción de limo ocurre entre 1,818 y 1,838 años calendario (133 y 113 años cal. AP), según el modelo edad (Figura 4) obtenido a partir de los fechamientos de radiocarbono realizados en el núcleo (Tabla 1), y se correlaciona con la

mayor concentración de metales pesados, carbono orgánico e inorgánico en el estudio (Galindo – Quijada, 2018).

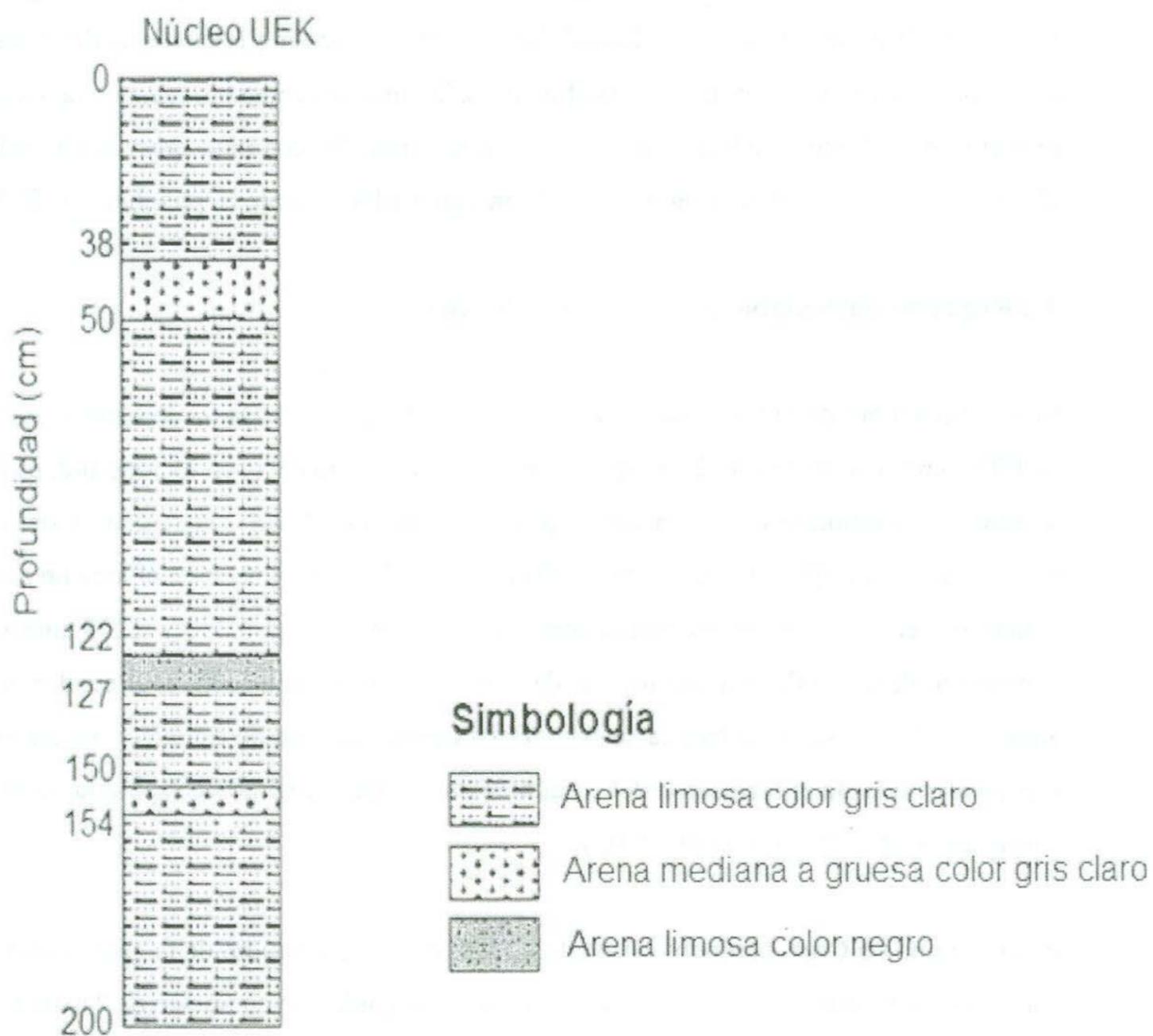


Figura 3. Columna estratigráfica del núcleo UEK, Laguna La Cruz, Sonora, México (modificado de Galindo – Quijada, 2018).

Tabla 1. Fechamientos de radiocarbono del núcleo UEK (Galindo – Quijada, 2018).

Código de laboratorio	Profundidad (cm)	Edad de ^{14}C (años AP)	Edad Calibrada (años cal. AP)		Material utilizado
			Max.	(Media) Min.	
17OS/0960	124	220 ± 30	215	(180) 145	Sedimentos orgánicos
17OS/0961	200	2610 ± 30	2776	(2748) 2720	Sedimentos orgánicos

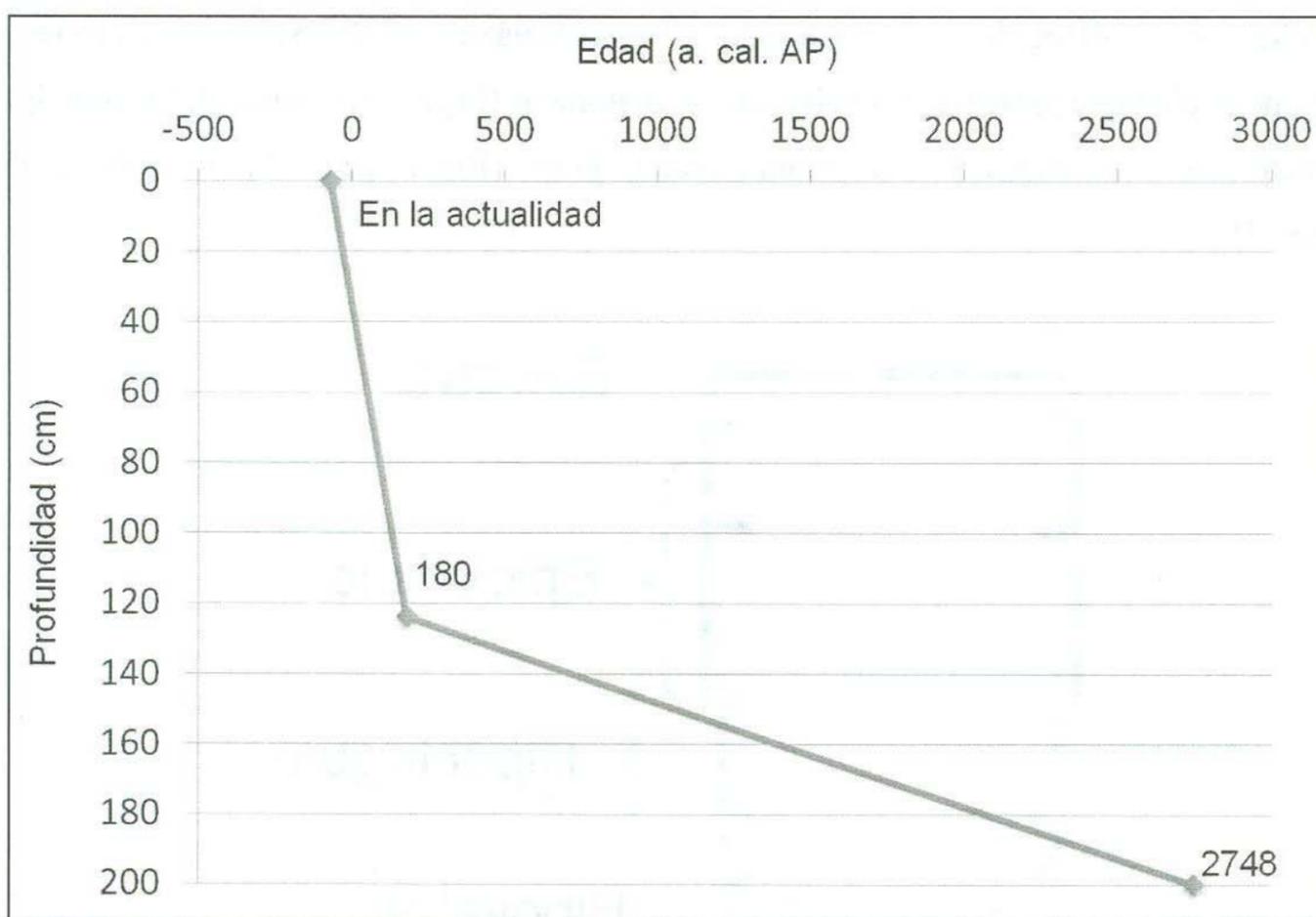


Figura 4. Modelo de edad para el núcleo UEK, Laguna La Cruz, Sonora, México (Galindo – Quijada, 2018).

3.3 Diatomeas y ambientes

Las diatomeas son algas unicelulares, eucariontes, pertenecientes a la División Bacillariophyta. Son organismos caracterizados por tener una estructura impregnada con sílice opalino (SiO_2) llamada frústula, la cual tiene una longitud de 5 μm a 2 mm, dependiendo de la especie (Brasier, 1980; Round et al., 1990).

La frústula (Figura 5) consiste en dos valvas o tecas, una con mayor tamaño que la otra, la de mayor tamaño se llama epiteca o epivalva y la hipoteca o hipovalva la de menor tamaño, las cuales se cierran como una caja para resguardar la célula viva, estas tecas se encuentran unidas por una serie de bandas que en su conjunto se le denomina cíngulo, el cual se encuentra dividido en epicíngulo e hipocíngulo (Tobón-Velázquez, 2015). Los patrones de ornamentación que presentan las valvas de las diatomeas (Figura 6) son una de las principales características utilizadas en la taxonomía de este grupo (Battarbee et al., 2001, Stoermer & Smol, 1999).

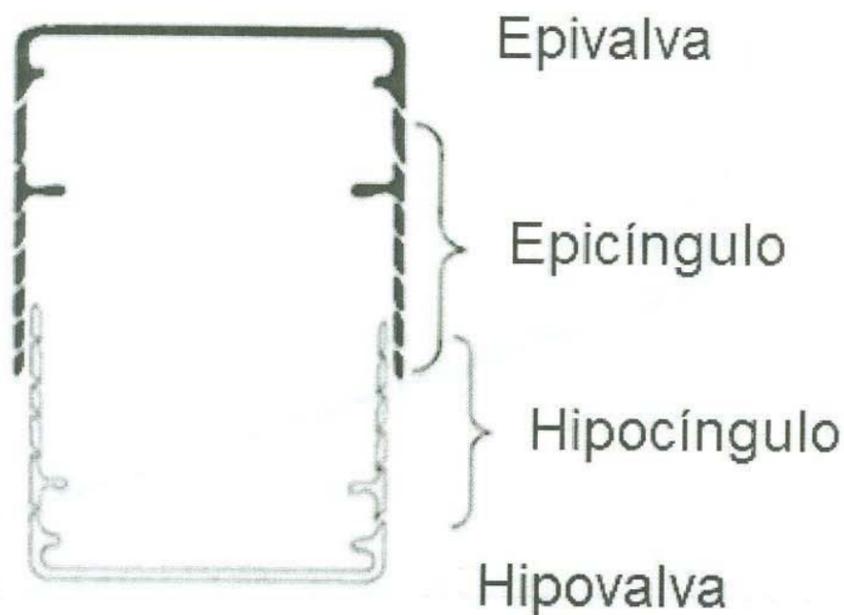


Figura 5. Morfología general de las diatomeas (Tomas, 1997).

La taxonomía del grupo es muy compleja, Round et al., (1990) reconocen tres clases dentro de la División Bacillariophyceae, la Clase Coscinodiscophyceae, que contiene a las anteriormente conocidas como diatomeas centrales, la Clase Fragilariophyceae que contiene a las diatomeas penales sin rafe, y la Clase Bacillariophyceae que contiene a las diatomeas penales con rafe.

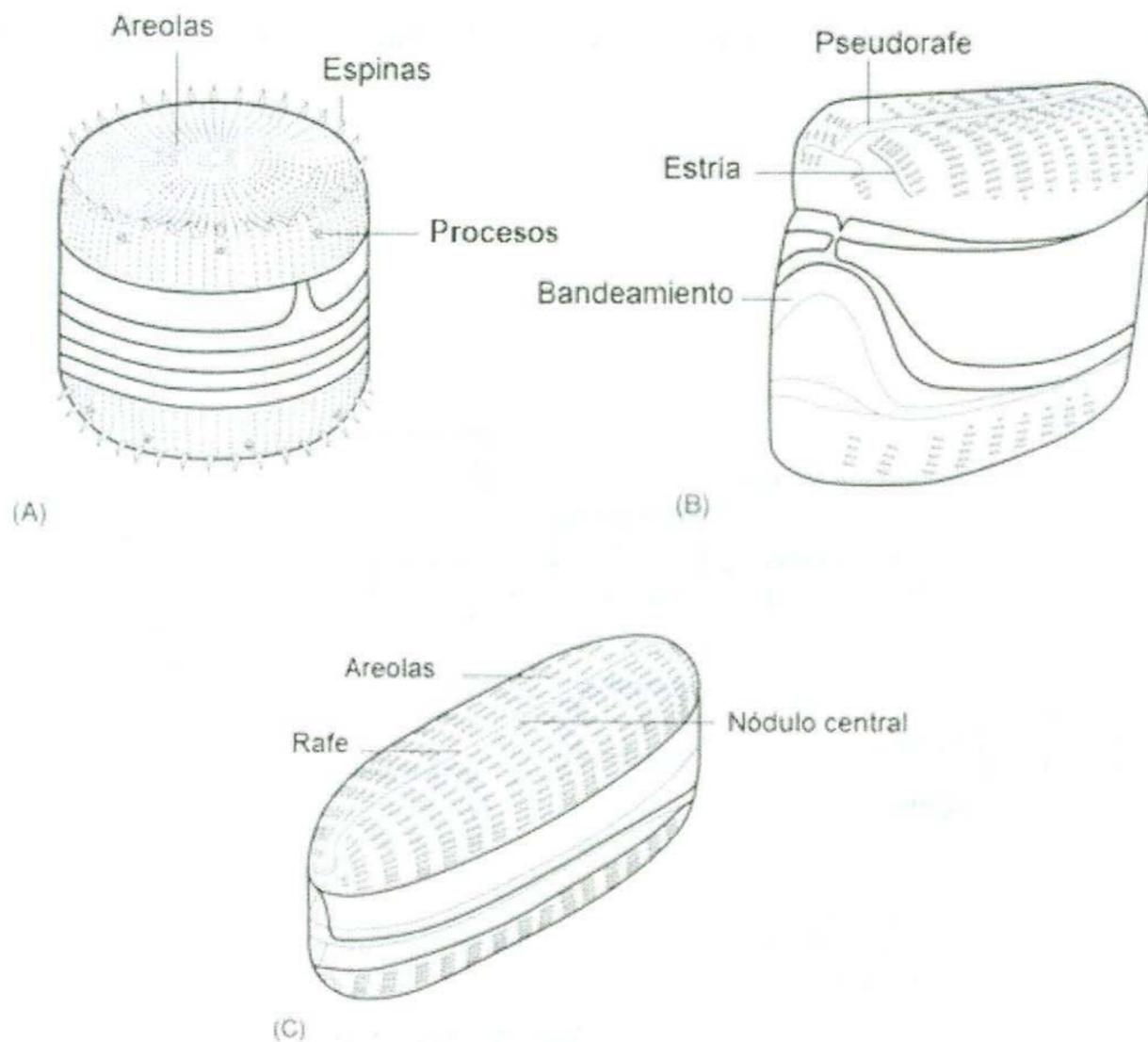


Figura 6. Ornamentación de las valvas de diatomeas.

A. Forma general de las diatomeas de la Clase Coscinodiscophyceae, con areolas, espinas y procesos. B. Forma general de las diatomeas de la Clase Fragilariophyceae, con estrías y pseudorafe. C. Forma general de las diatomeas de la Clase Bacillariophyceae, con rafe, areolas y nódulo central (Modificado de Jones, 2007).

Las diatomeas presentan dos tipos de reproducción (Figura 7). La forma de reproducción más común es por división celular, donde la frústula se separa en dos (epiteca e hipoteca) y forma una nueva valva (hipoteca) para completar la frústula, así una de las células hijas conserva el tamaño y la otra queda más pequeña que la frústula madre, repitiéndose el mismo patrón para las futuras divisiones, lo cual conlleva a una disminución progresiva del tamaño de una de las frústulas hijas, hasta un tamaño mínimo determinado. Una vez alcanzado la talla mínima, se lleva a cabo la reproducción sexual a través de meiosis, manteniendo la variabilidad genética y restableciendo el tamaño de la especie (Grethe et al., 1996).

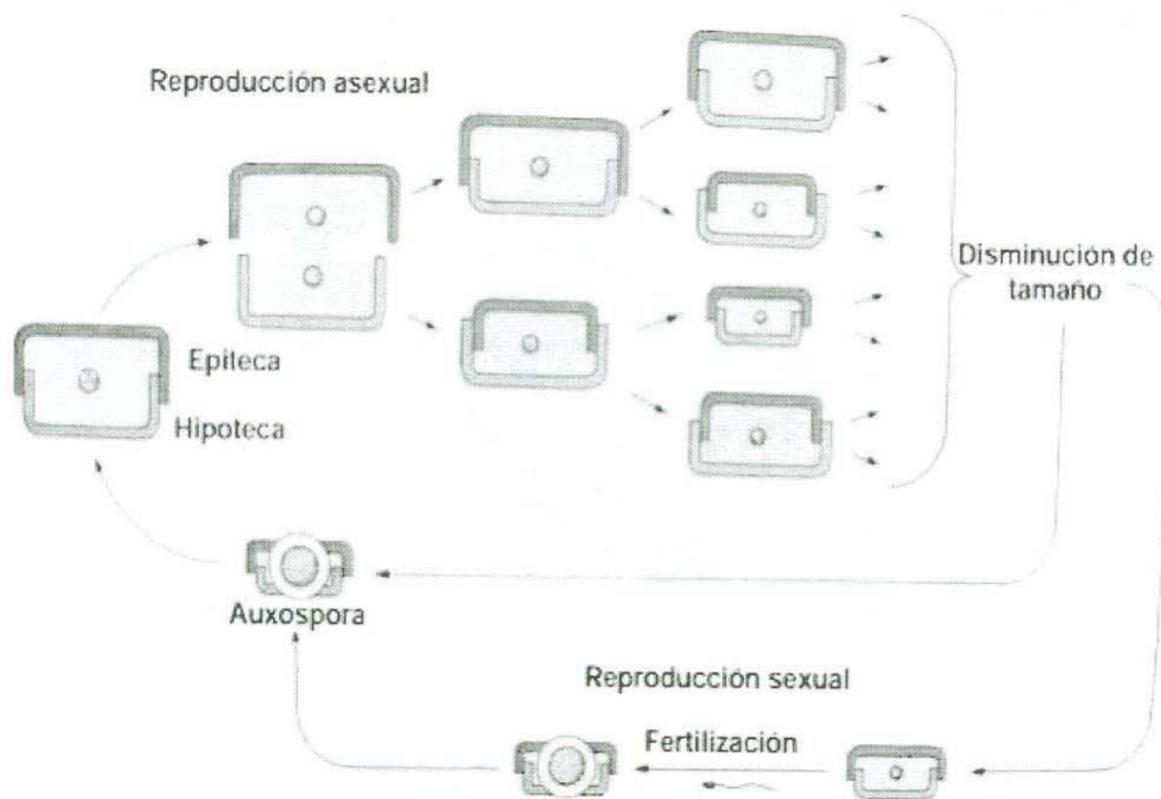


Figura 7. Ciclo de reproducción asexual de las diatomeas, y transformación a reproducción sexual (Peña, 2011).

Las diatomeas se encuentran en un amplio rango de ambientes marinos y algunos medios continentales. Estos organismos pueden vivir anclados a plantas o rocas (forma de vida bentónica) o de manera flotante (forma de vida planctónica), y están limitados a una profundidad máxima de 200 metros. La distribución y el crecimiento de las especies están limitados por distintas variables como la temperatura, el pH, la salinidad del agua, la disponibilidad de oxígeno y el contenido de nutrientes en el medio (Sancetta et al., 1991; Villareal et al., 1993). Estas características han sido un gran apoyo para realizar reconstrucciones paleoceanográficas, paleoambientales y paleoclimáticas durante el pasado geológico (Battarbee, 1991). La técnica ha sido utilizada en estudios con énfasis en la identificación del enriquecimiento de nutrientes, la acidificación y los cambios en la salinidad del medio (Battarbee et al., 1990).

IV. JUSTIFICACIÓN

La Laguna La Cruz presenta características físicas y químicas favorables para la preservación de las valvas de diatomeas, por lo que es posible realizar un estudio paleoecológico que permita evaluar los cambios paleoambientales ocurridos durante los últimos 2,800 años, con el propósito de conocer si en la laguna existieron cambios en las condiciones climáticas que podrían haber modificado su dinámica hidrogeológica, ya que no existen estudios similares suficientes en la región de la costa central del estado de Sonora.

V. HIPÓTESIS

Los últimos 2,800 años de la historia de la Tierra se han caracterizado por una gran variabilidad climática. Las oscilaciones en la temperatura y en la precipitación, reconocidas en los estudios sobre reconstrucciones ambientales, indican que las especies cambiaron sus patrones de distribución como respuesta a estas variaciones climáticas. Por lo tanto, estos cambios se verán reflejados en la diversidad, abundancia y distribución de las especies de diatomeas en los sedimentos del núcleo UEK, de la Laguna La Cruz, Sonora, México.

VI. OBJETIVO

6.1 Objetivo general

Describir los cambios ambientales en la Laguna la Cruz, Sonora, México durante los últimos 2,800 años a través de los análisis geoquímicos y de asociaciones de diatomeas preservadas en los sedimentos.

6.2 Objetivos específicos

- Determinar los índices de escorrentía y salinidad en los sedimentos del núcleo UEK.
- Identificar hasta el mínimo nivel taxonómico posible las diatomeas preservadas.
- Describir las variaciones ambientales ocurridas en la laguna a través del tiempo.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Muestreo del núcleo

La extracción del núcleo de sedimentos de la Laguna La Cruz (Figura 8), se realizó en septiembre de 2017 (Figura 9), utilizando un muestreador de turbas o barrena rusa (Jowsey, 1966). El núcleo UEK (Figura 10) fue obtenido cerca de las instalaciones de la Unidad Experimental Kino (UEK), del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (DICTUS).

Después de la extracción del núcleo UEK, se realizó la descripción del mismo conforme a las características texturales de los sedimentos, como tamaño de grano y color. Posteriormente, se obtuvieron muestras cada 10 cm para el análisis geoquímico y cada 5 cm para el análisis de diatomeas. Las muestras obtenidas se resguardaron en bolsas de plástico, con su respectiva etiqueta, para su traslado al laboratorio.

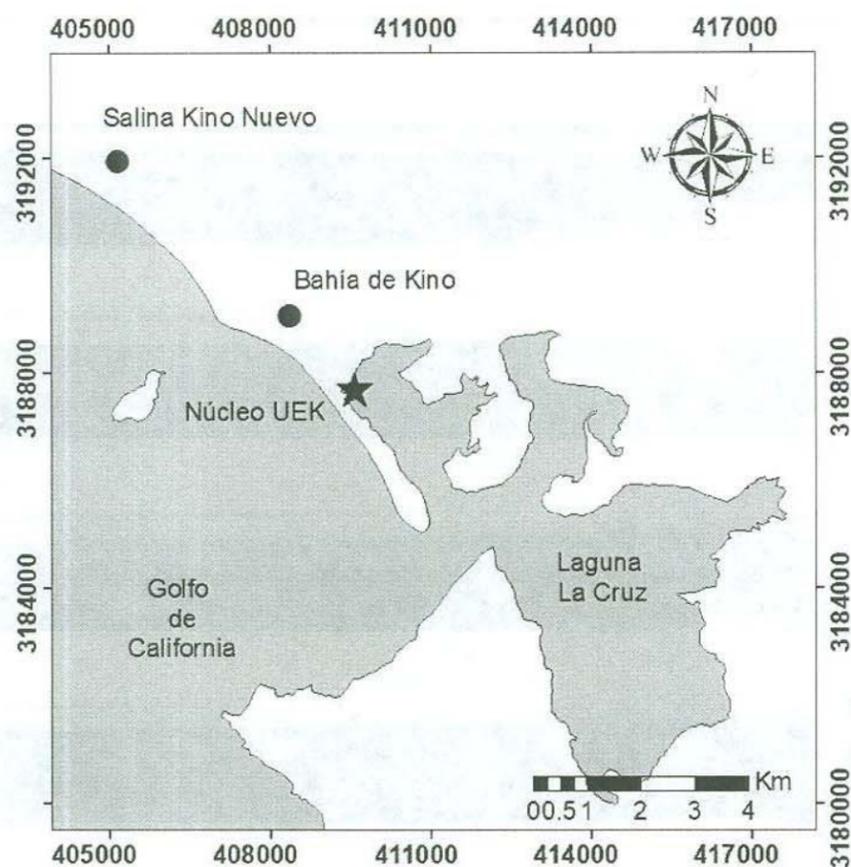


Figura 8. Localización del sitio de muestreo.



Figura 9. Extracción del núcleo de sedimentos en la Laguna La Cruz, Sonora, México.

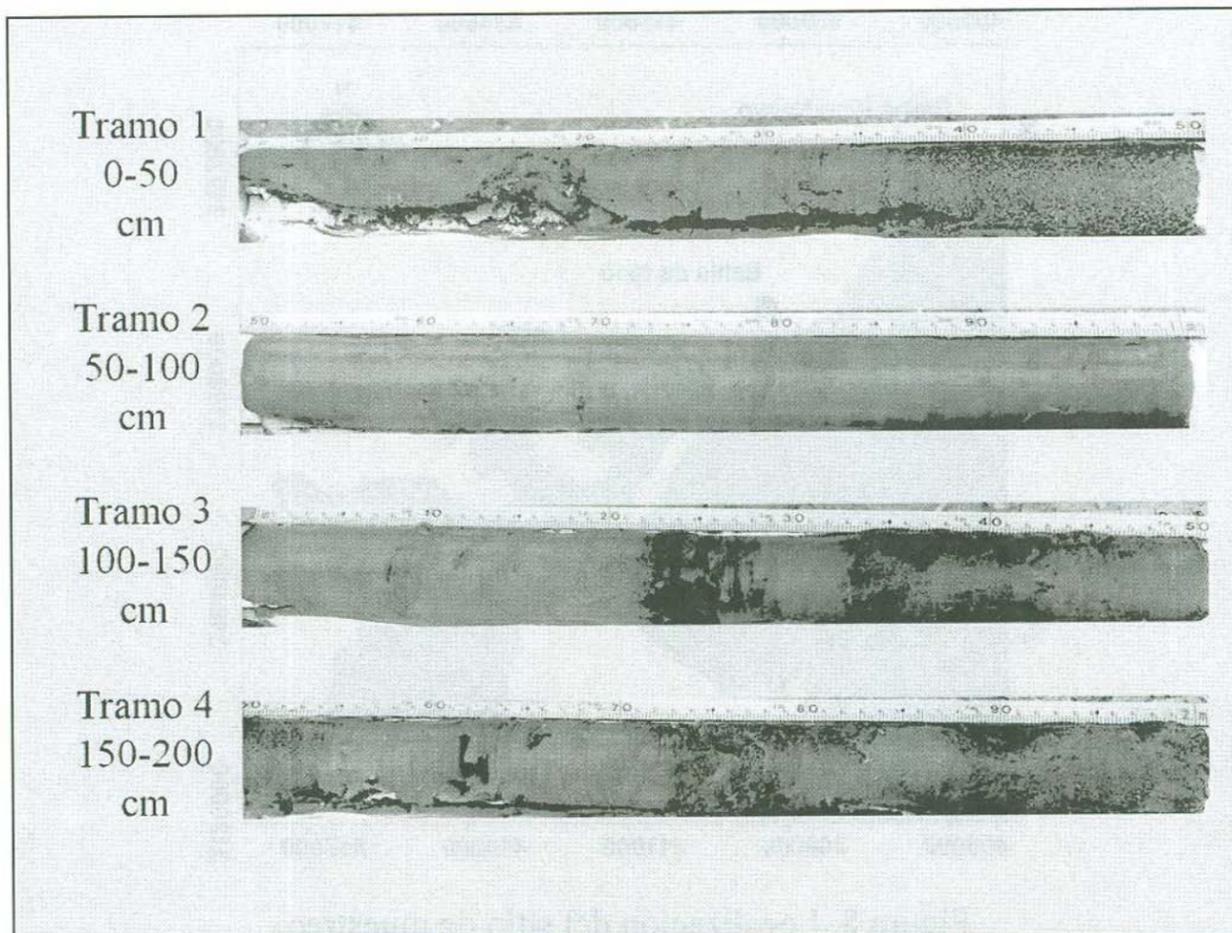


Figura 10. Núcleo UEK, Laguna La Cruz, Sonora, México.

7.2 Análisis Geoquímico

Se seleccionaron 12 muestras para el análisis geoquímico (Tabla 2). Se enviaron 5 gramos por muestra al laboratorio Bureau Veritas Minerals en Hermosillo, Sonora, donde se analizaron por el método de espectroscopía de emisión de plasma acoplado inductivamente (ICP-ES).

Tabla 2. Muestras seleccionadas para el análisis geoquímico.

No.	Muestra	No.	Muestra	No.	Muestra
1	UEK-20	5	UEK-100	9	UEK-150
2	UEK-40	6	UEK-120	10	UEK-160
3	UEK-60	7	UEK-130	11	UEK-180
4	UEK-80	8	UEK-140	12	UEK-200

En el análisis se determinaron las concentraciones de Aluminio (Al), Calcio (Ca), Estroncio (Sr), Hierro (Fe), Magnesio (Mg), Potasio (K), Sodio (Na) y Titanio (Ti). Con estos resultados, se estimó el Índice de Alteración Química (CIA), propuesto por Nesbitt y Young (1982), con la fórmula:

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \times 100$$

**representa la cantidad de CaO en los minerales silicatados solamente*

Para obtener el valor de CaO* se siguió el método propuesto por McLennan (1993), en el cual los valores de CaO son aceptados solamente si $CaO < Na_2O$ y, por lo tanto, en caso contrario se sustituye por el valor de Na₂O.

Para determinar los índices de escorrentía y salinidad, se compararon las concentraciones de los elementos Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Sr y Ti contra los valores calculados de CIA, y se eligieron los que presentaron un mayor coeficiente de determinación (R²). Las gráficas y cálculos se realizaron en el programa Microsoft Excel®.

7.3 Análisis de diatomeas

Para el procesamiento de las 22 muestras seleccionadas (Tabla 3) se tomaron 0.5 g de sedimento seco en un vaso de precipitado, se les agregó ácido clorhídrico (HCl) para eliminar los carbonatos, y se colocaron en una placa de calentamiento (Figura 11-A), para acelerar la reacción. Después se les agregó peróxido de hidrógeno (H₂O₂), se colocaron en la placa de calentamiento durante 30 minutos para eliminar el contenido de materia orgánica. A continuación, el residuo se colocó en un tubo de ensayo con agua desionizada y se realizaron tres lavados en una centrífuga Thermo Scientific® modelo Sorvall ST 8 (Figura 11-B), para neutralizar el pH. Las muestras se resguardaron en frascos, previamente etiquetados, aforados a 50 ml.

Tabla 3. Muestras seleccionadas para el análisis de diatomeas.

No.	Muestra	No.	Muestra	No.	Muestra
1	UEK-10	9	UEK-90	17	UEK-150
2	UEK-20	10	UEK-100	18	UEK-160
3	UEK-30	11	UEK-110	19	UEK-170
4	UEK-40	12	UEK-120	20	UEK-180
5	UEK-50	13	UEK-125	21	UEK-190
6	UEK-60	14	UEK-130	22	UEK-200
7	UEK-70	15	UEK-140		
8	UEK-80	16	UEK-145		

Para cada muestra se montaron 50 µl en portaobjetos, utilizando una micropipeta Transferpette® S de 10 µl (Figura 11-C), y se colocaron en una placa de calentamiento para evaporar el agua. Una vez seca, en la misma placa de calentamiento, se colocó un cubreobjetos con bálsamo de Canadá para sellar el montaje.

Las preparaciones fueron observadas en un microscopio óptico Leica® Galen III (Figura 11-D), con un objetivo de 100x para determinar las especies presentes y su abundancia relativa. Para cada muestra se realizó un conteo mínimo de 300 valvas, en muestras con poca abundancia se determinó un mínimo cercano a 100 valvas para considerarse en el presente estudio, muestras con menor contenido de valvas solo fueron utilizadas como referencia del contenido de diatomeas fósiles en el núcleo. Las diferentes especies fueron fotografiadas con una cámara Dual Pixel 12.0 MP y para la elaboración de un atlas de diatomeas fósiles del sitio.

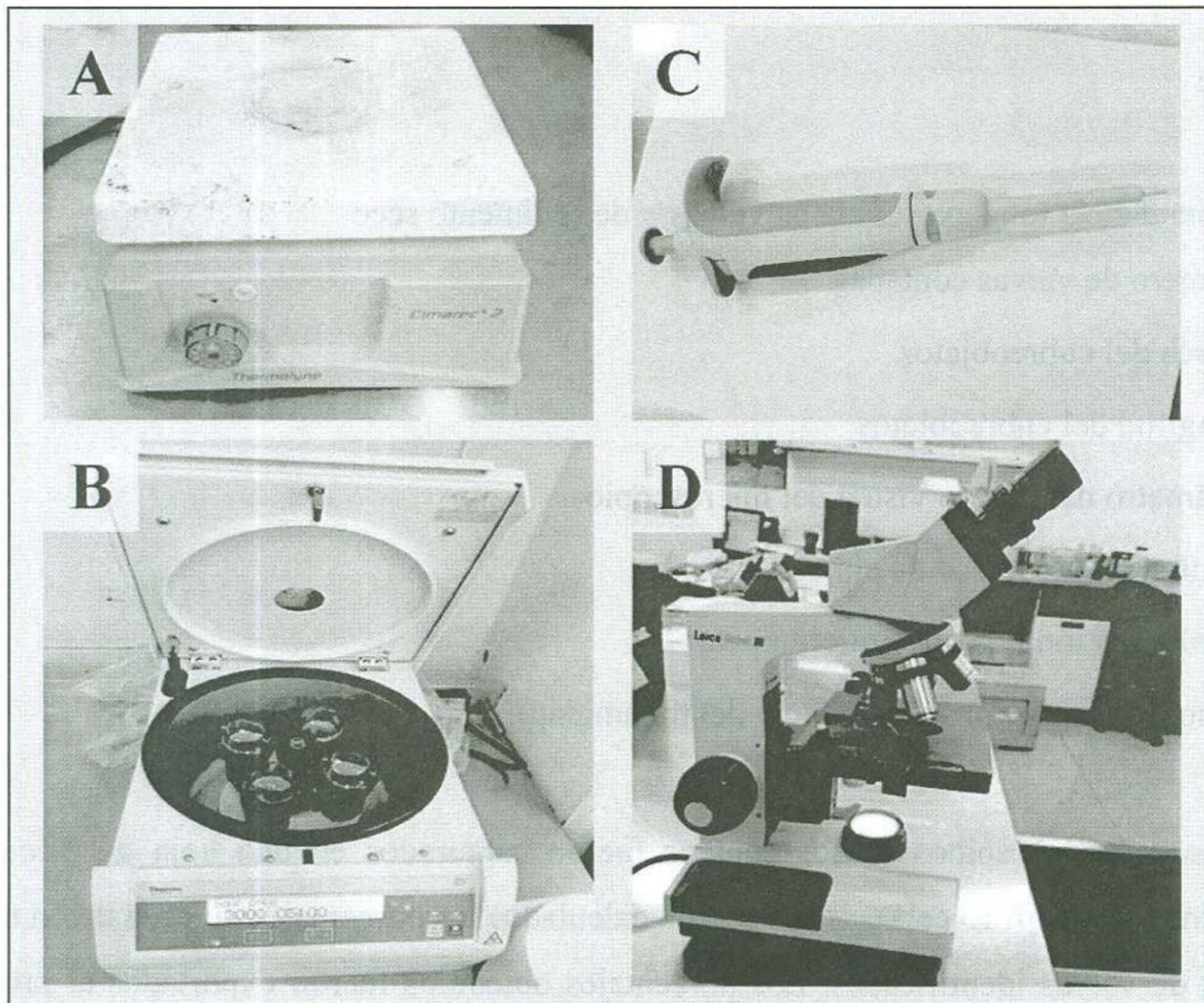


Figura 11. Equipo utilizado para el análisis de diatomeas.

- A. Placa de calentamiento. B. Centrífuga Thermo Scientific® modelo Sorvall ST. 8.
C. Micropipeta Transferpette® S de 10 µl. D. Microscopio óptico Leica® Galen III.

Las determinaciones taxonómicas se realizaron utilizando los trabajos de Licea Duran (1974), López Fuerte et al., (2010), Siqueiros Beltrones et al. (2010, 2014, 2015, 2017), Mejía Rodríguez (2011), Tobón Velázquez (2015), así como las bases de datos digitales: www.algaebase.org, www.marinespecies.org y taxomicon.taxonomy.nl.

Se calculó la abundancia total de valvas de diatomeas por muestra utilizando la fórmula propuesta por Gasse (1980):

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

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 = diámetro del campo visual del microscopio

V_1 = volumen del frasco de almacenaje

V_2 = volumen tomado en la micropipeta

P = peso de sedimento seco al inicio del tratamiento

Los resultados obtenidos en los conteos fueron capturados en una hoja de cálculo del programa Microsoft Excel®, donde fueron calculados los porcentajes de cada taxón en base al total de valvas identificadas. Los porcentajes obtenidos fueron exportados al programa Tilia® 2.0.41 (Grimm, 1991-2015) para graficar los resultados del análisis.

7.4 Tratamiento estadístico

Se llevó a cabo un análisis clúster de agrupamiento aglomerativo y jerárquico estratigráficamente restringido (Grimm, 1987), CONISS por sus siglas en inglés, por el método de suma total de cuadrados, incluido en el programa Tilia® 2.0.41 (Grimm, 1991-2015). El análisis CONISS permite agrupar los datos obtenidos en el análisis de diatomeas para definir las zonas de diatomeas, una forma de agrupar las muestras que presentan una semejanza en las asociaciones de diatomeas preservadas. El límite entre las zonas propuestas por el análisis CONISS fue definido por el valor medio de las profundidades de las muestras más próximas en cada una de las asociaciones de diatomeas (Gasse, 1980).

También se realizó un análisis de correspondencia sin tendencia (Gauch, 1982; Pielou, 1984), DCA por sus siglas en inglés, con el programa Past 3.20 (Hammer et al., 2001), para los datos obtenidos en el análisis geoquímico y en el análisis de diatomeas. El DCA es un método para agrupar los datos a partir de las semejanzas que presentan las variables estudiadas, sin restricción estratigráfica a diferencia del análisis CONISS, que si presenta esta restricción.

VIII. RESULTADOS

8.1 Análisis Geoquímico

Los sedimentos del núcleo UEK presentan concentraciones entre 5.89-6.93% de Al, 1.30-2.82% de Fe, 0.13-0.24% de Ti, 1.03-3.26% de Ca, 2.95-3.22 de K, 0.59-1.72% de Mg, 2.43-3.11% de Na, y 216-369 ppm de Sr (Figura 12), los resultados de cada muestra analizada se encuentran en el Apéndice I.

En forma general, los elementos Al, Na y Ti, presentan una distribución similar a lo largo del núcleo. Las distribuciones de Mg y Fe son ligeramente compatibles con las anteriores, difieren en que la distribución de Mg presenta cambios muy tenues, mientras que la distribución de Fe, sigue una tendencia diferente en la base del núcleo, pero similar hacia la cima. Al contrario a estos elementos descritos, la distribución de Ca y Sr es completamente diferente. Por ejemplo, cuando los valores de estos elementos aumentan, Al y Ti presentan porcentajes bajos, mientras que sus valores presentan una tendencia hacia la baja cuando Al y Ti aumentan su concentración. La distribución de K es similar a las tendencias que siguen los elementos Ca y Sr, difiere de estas en la base presentando una disminución en su concentración en comparación con el aumento que presentan los demás elementos, y en la parte media del núcleo, donde presenta una disminución en su concentración, más abrupta que la de Ca y Sr.

El Índice de Alteración Química (CIA) varía entre 40.89 y 49.03 (Figura 13), los valores calculados se encuentran dentro del campo de Sin/baja meteorización, según Nesbitt y Young (1984, 1989). Los valores máximos de CIA se presentan en las muestras UEK-100 y UEK-80, mientras que los valores mínimos se observan en las muestras basales UEK-200 y UEK-180.

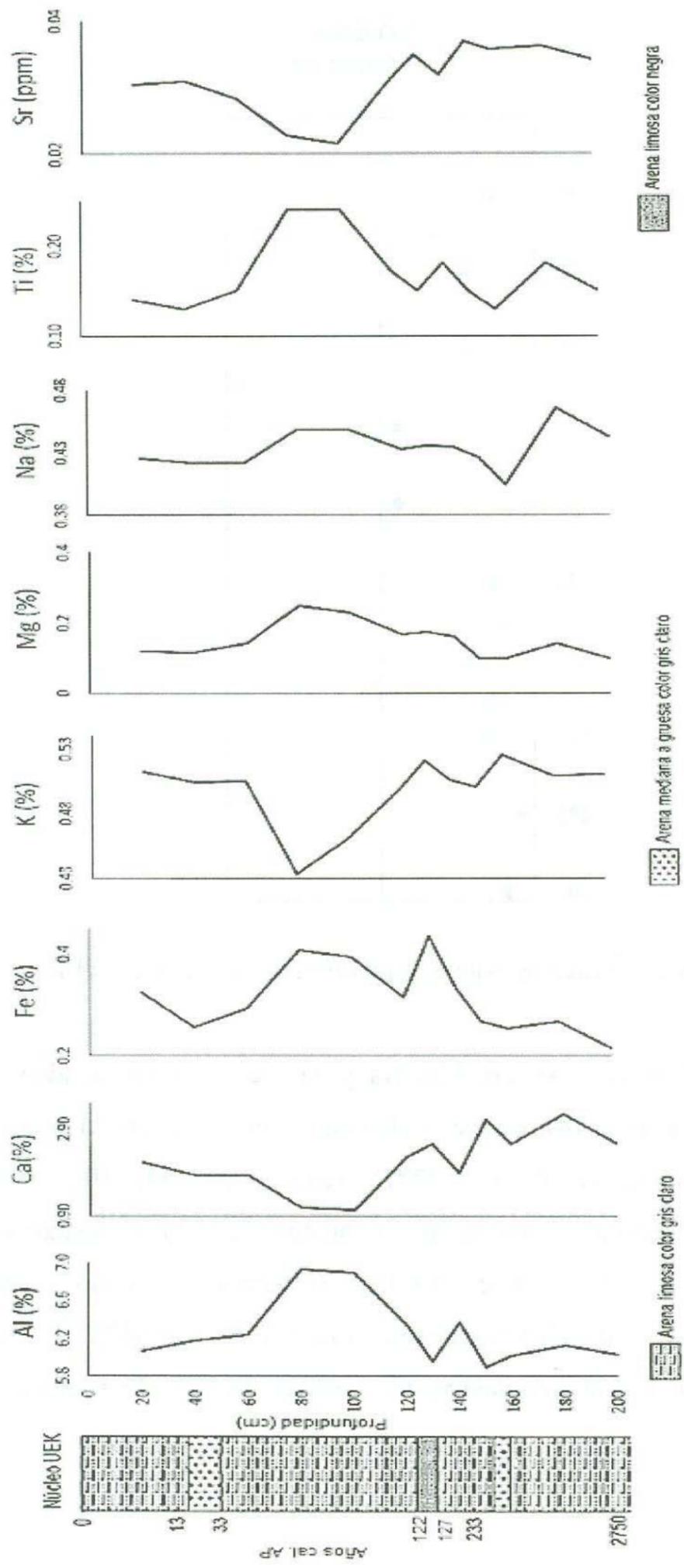


Figura 12. Estratigrafía y concentración de Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Sr y Ti en el núcleo UEK.

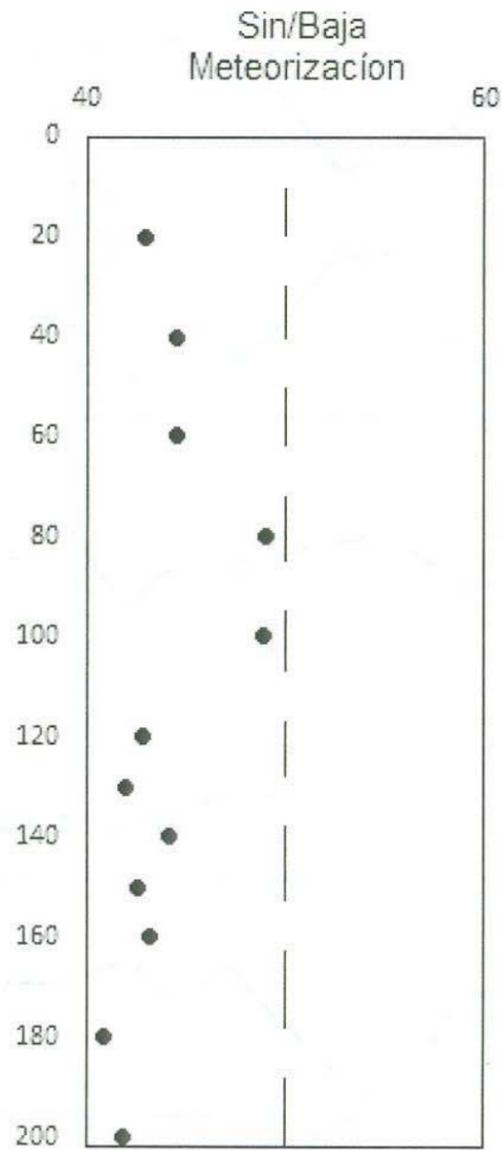


Figura 13. Índice de Alteración Química en el núcleo UEK.

Los valores de los elementos Al, Fe, Mg, Na y Ti presentan una tendencia positiva al incremento del CIA (Figura 14), de estos elementos, el elemento Al presenta el mayor coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8277$), seguido por Mg ($R^2 = 0.6629$) y Ti ($R^2 = 0.5649$). Las concentraciones de los elementos Ca y Sr presentan una tendencia negativa al incrementarse los valores del CIA (Figura 14), siendo el coeficiente de determinación de Sr ($R^2 = 0.8520$) mayor que el de Ca ($R^2 = 0.8475$). El elemento K no presenta una tendencia clara al incrementarse los valores del CIA ($R^2 = 6E^{-5}$).

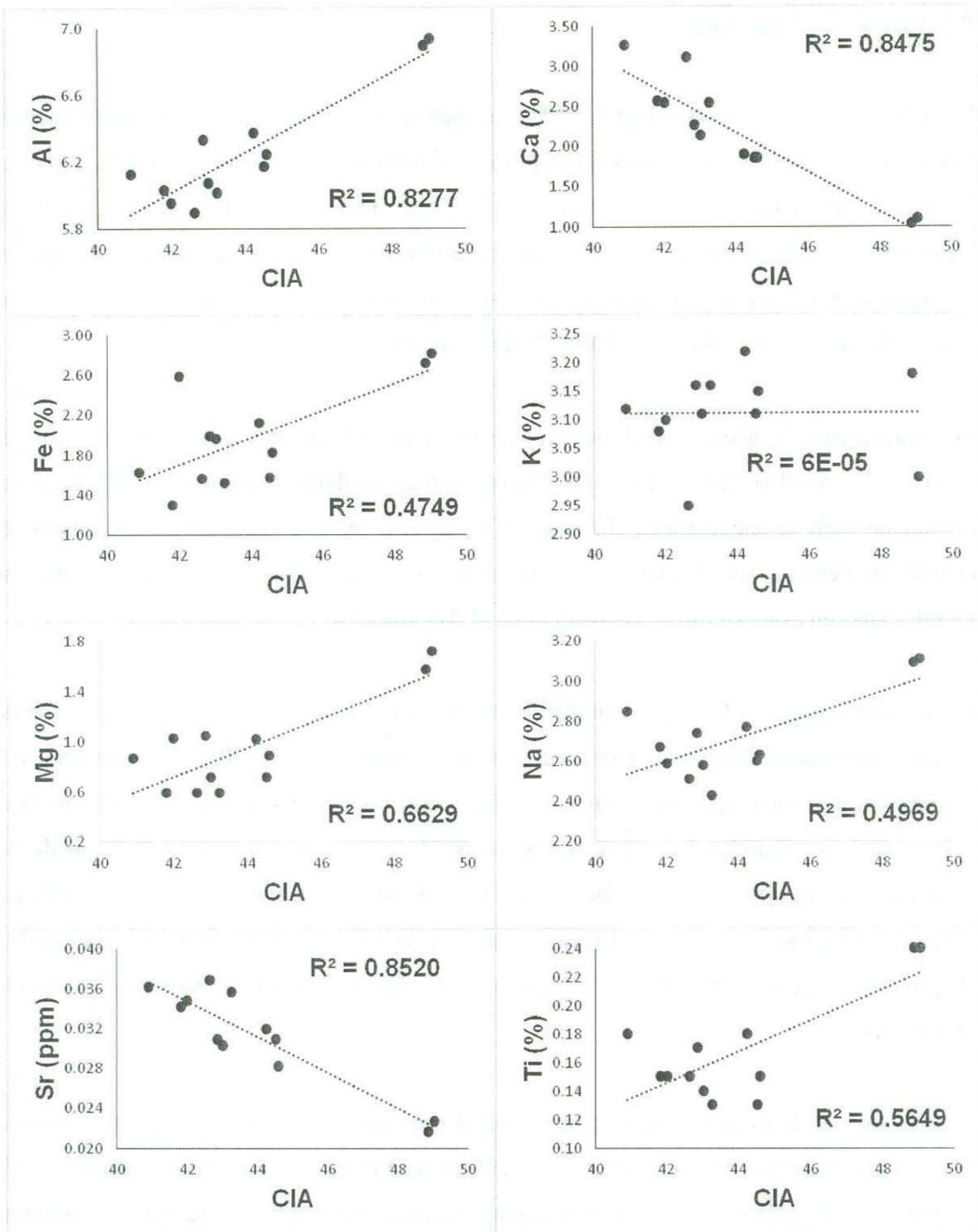


Figura 14. Gráficos de dispersión de cada elemento vs CIA, con su coeficiente de determinación.

8.2 Análisis de diatomeas

Se analizaron 22 horizontes del núcleo UEK, en diez de las muestras se contaron por lo menos 300 valvas/muestra, en siete muestras se alcanzó el mínimo de 100 valvas/muestra, dos más quedaron próximas a esta marca, y en tres muestras (UEK-40, UEK-50 y UEK-190) la abundancia fue tan baja que no fue posible realizar los conteos. El rango de abundancia de valvas de diatomeas por gramos de sedimento (valvas/g), en los 19 horizontes contabilizados, se calculó entre 3,200 y 71,800 valvas/g.

Se identificaron 70 taxones de diatomeas, de las cuales 68 fueron identificadas a nivel de especie y 2 a nivel de género. El listado taxonómico de las diatomeas encontradas a lo largo del núcleo UEK se encuentra en el Apéndice B, sus principales características ecológicas se encuentran descritas en el Apéndice C, las imágenes capturadas de las principales especies identificadas en este estudio se encuentran en el Apéndice IV.

Del total de taxones, solo 14 presentaron una abundancia mayor al 5%. En todas las muestras el taxón dominante fue *Paralia sulcata*, con una frecuencia entre 20 y 75%, seguida en abundancia por *Dimeregramma minor* (2-23%) y *Nitzschia granulata* (4-15%). El resto de los taxones con abundancia mayor al 5%, en por lo menos una muestra a lo largo de la columna estratigráfica son: *Achnanthes curvirostrum*, *Amphora proteus*, *Fragilaria capensis*, *Navicula directa*, *Nitzschia compressa*, *Opephora schwartzii*, *Petronis granulata*, *Plagiogramma tessellatum*, *Rhopalodia accuminata*, *Rhopalodia musculus* y *Thalassiosira eccentrica*.

El diagrama de diatomeas fósiles obtenido en el presente estudio (Figura 15), muestra las frecuencias relativas del total de taxones identificados en las muestras analizadas. El diagrama fue dividido verticalmente en cuatro biozonas, basado en el resultado del análisis CONISS, y horizontalmente por grupos ecológicos de acuerdo a la forma de vida y salinidad de los taxones identificados. A continuación se describen las zonas identificadas:

Zona A (200-175 cm; ~2750 a 1900 años cal AP). Se caracteriza por el dominio de *Paralia sulcata* (29-36%), *Dimeregramma minor* (12-22%) y *Nitzschia granulata* (11- 15%). Con una frecuencia relativa entre 5 y 10% se encuentra *Navicula directa*. Otros taxones presentes, con porcentajes inferiores al 5%, son: *Actinoptychus aff. cathedralis*, *Amphora angusta*, *A. ostrearia*, *A. proteus*, *A. terroris*, *A. ventricosa*, *Cerataulus californicus*, *Coscinodiscus apiculatus*, *Cyclotella litoralis*, *Encyonema sp.*, *Eunotogramma laevis*, *Fallacia forcipata*, *F. hummii*, *Gyrosigma balticum*, *Lyrella irrorata*, *L. lyra*, *L. praetexta*, *Navicula spectabilis*, *Nitzschia sigma*, *Petroneis granulata*, *Plagiogramma tessellatum*, *P. wallichianum*, *Psammodictyon panduriforme*, *Rhopalodia accuminata*, *R. gibberula*, *R. musculus* y *Stephanopyxis palmeriana*. La abundancia total varía entre 3,200 y 12,000 valvas/g.

Zona B (175-105 cm; ~1900 a 140 años cal AP). Se caracteriza por ser la zona con el mayor registro de taxones, continúan dominando *Paralia sulcata* (21-75%), *Dimeregramma minor* (3-14%) y *Nitzschia granulata* (6-12%). Con una frecuencia relativa entre 5 y 10% se observan *Fragilaria capensis*, *Opephora schwartzii*, *Petroneis granulata*, *Rhopalodia accuminata* y *R. musculus*. Los taxones presentes con menor porcentaje son: *Achnanthes angustata*, *A. curvirostrum*, *A. javanica*, *A. yaquinensis*, *Actinoptychus aff. cathedralis*, *Amphora angusta*, *A. arenicola*, *A. ostrearia*, *A. proteus*, *A. spectabilis*, *A. terroris*, *A. ventricosa*, *Auliscus sculptus*, *Bacillaria socialis*, *Bidulphia tridens*, *Cerataulus californicus*, *Cocconeis disculus*, *C. scutellum*, *Coscinodiscus apiculatus*, *Cydotella litoralis*, *Delphineis fasciola*, *Diploneis crabro*, *Eunotogramma laevis*, *Fallacia forcipata*, *F. hummii*, *F. nummularia*, *Fragilaria crotonensis*, *Grammatophora marina*, *Gyrosigma balticum*, *G. eximium*, *Licmophora abbreviata*, *Lyrella irrorata*, *L. lyra*, *Mastogloia angulata*, *M. Barunii*, *M. fallax*, *Navicula cancellata*, *N. directa*, *N. meniscoides*, *N. peregrina*, *N. spectabilis*, *Nitzschia fluminenses*, *N. sigma*, *Plagiogramma interruptum*, *P. rhombicum*, *P. tessellatum*, *P. wallichianum*, *Pleurosira laevis*, *Psammodictyon panduriforme*, *Rhizosolenia bergonii*, *Rhopalodia gibberula*, *Surirella febigeri*, *S. turgida* y *Thalassiosira eccentrica*. La abundancia total varía de 4,300 a 42,000 valvas/g.

Zona C (105-50 cm; ~140 a 30 años cal. AP). Se caracteriza por el dominio de *Paralia sulcata* (20-49%), *Dimeregramma minor* (4-12%) y *Rhopalodia musculus* (2-11%). Con una frecuencia relativa entre 5 y 10% se encuentran *Fragilaria capensis*, *Nitzschia granulata*, *Opephora schwartzii*, *Rhopalodia accuminata* y *Thalassiosira eccentrica*. Otros taxones presentes con porcentajes inferiores a 5%, son: *Achnanthes curvirostrum*, *A. javanica*, *Actinoptychus hexagonus*, *Amphora angusta*, *A. arenicola*, *A. ostrearia*, *A. proteus*, *A. spectabilis*, *A. terroris*, *Bacillaria socialis*, *Cocconeis scutellum*, *Coscinodiscus apiculatus*, *Cydotella litoralis*, *Delphineis fasciola*, *Diploneis crabro*, *Eunotogramma laevis*, *Fallacia forcipata*, *F. hummii*, *F. nummularia*, *Fragilaria crotonensis*, *Grammatophora marina*, *Gyrosigma balticum*, *G. eximium*, *Lyrella lyra*, *Mastogloia fallax*, *Navicula directa*, *N. meniscoides*, *N. spectabilis*, *Nitzschia fluminenses*, *N. longissima*, *N. sigma*, *Petroneis granulata*, *Pinnularia yarrensis*, *Plagiogramma interruptum*, *P. rhombicum*, *P. wallichianum*, *Psammodictyon panduriforme*, *Rhizosolenia bergonii*, *Rhopalodia gibberula*, *Stenopterobia sp.* y *Surirella febigeri*. La abundancia total varía entre 34,900 y 71,800 valvas/g, la mayor del presente estudio.

Zona D (50-0 cm; 30 años cal. AP a la actualidad). Se caracteriza por el dominio de *Paralia sulcata* (29-53%), *Dimeregramma minor* (6-14%) y *Amphora proteus* (3-14%). Con una frecuencia relativa entre 5 y 10% se observan *Nitzschia compressa*, *N. granulata*, *Opephora schwartzii* y *Plagiogramma tessellatum*. Los taxones presentes con un porcentaje menor son: *Achnanthes curvirostrum*, *A. javanica*, *A. yaquinensis*, *Actinoptychus hexagonus*, *Amphora arenicola*, *A. spectabilis*, *Cerataulus californicus*, *Coscinodiscus apiculatus*, *Cydotella litoralis*, *Eunotogramma laevis*, *Fallacia forcipata*, *F. hummii*, *F. nummularia*, *Fragilaria capensis*, *Grammatophora marina*, *Lyrella lyra*, *Navicula spectabilis*, *Petroneis granulata*, *Plagiogramma interruptum*, *P. wallichianum*, *Pinnularia yarrensis*, *Rhopalodia accuminata*, *R. musculus* y *Thalassiosira eccentrica*. La abundancia total varía de 6,600 y 22,600 valvas/g.

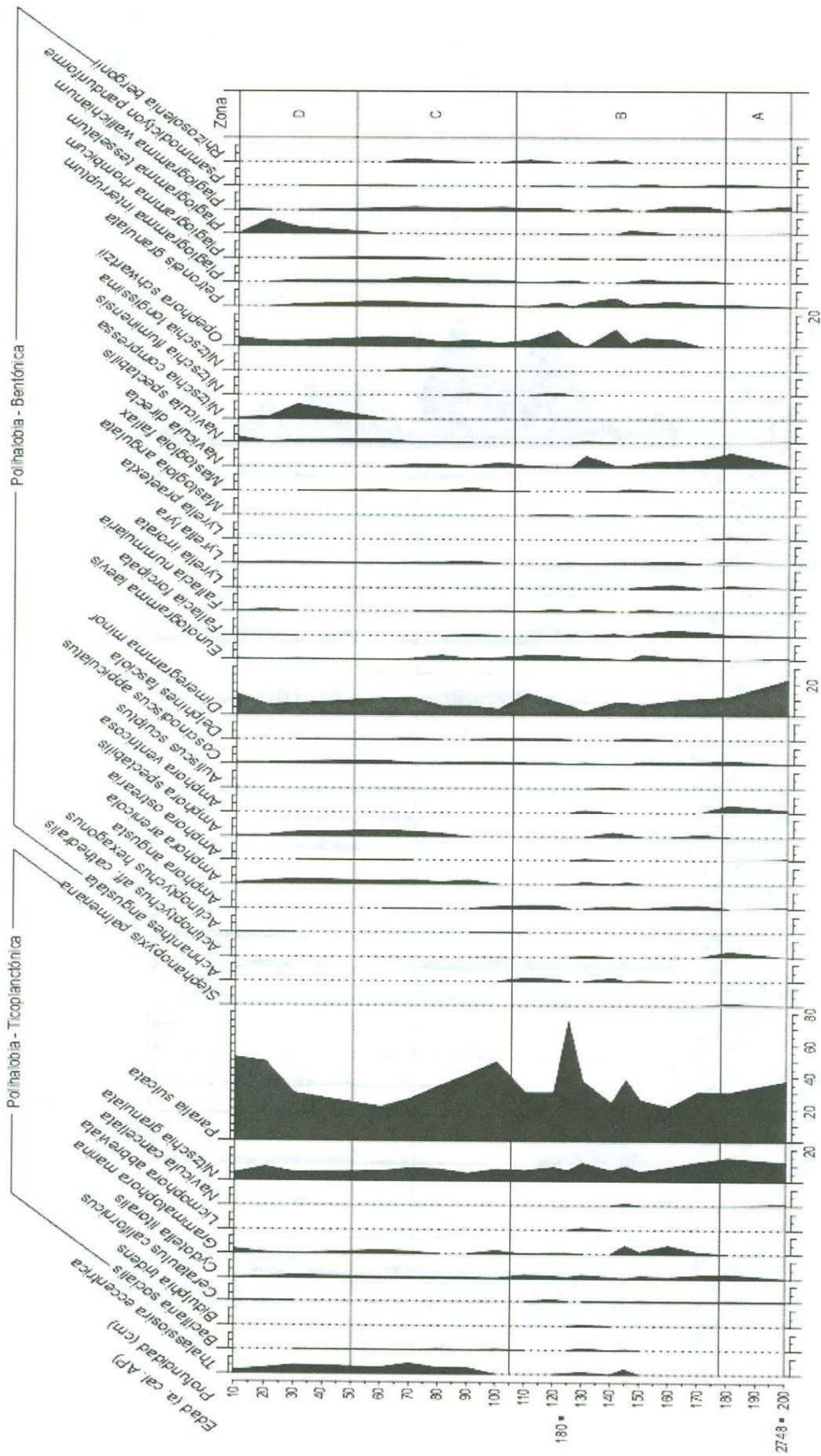


Figura 15. Diagrama de diatomeas.

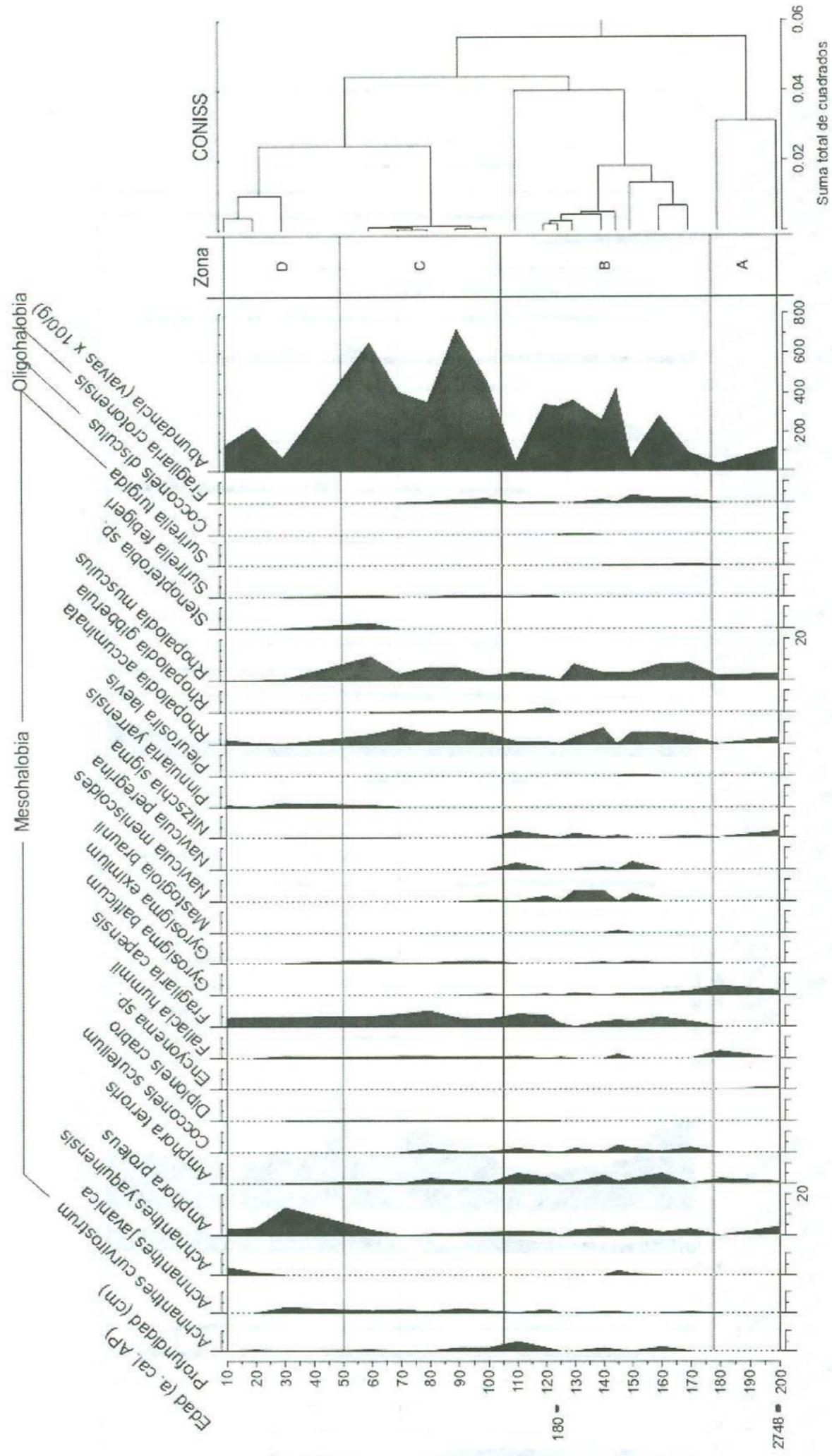


Figura 15 (Continuación). Diagrama de diatomeas.

8.3 Análisis estadístico

El análisis de correspondencia sin tendencia (DCA) se realizó utilizando 11 muestras (UEK-200, UEK-180, UEK-160, UEK-150, UEK-140, UEK-130, UEK-120, UEK-100, UEK-80, UEK-60 y UEK-20). Las muestras seleccionadas para este análisis estadístico, fueron aquellas donde los conteos de diatomeas fueron superiores o cercanos a 100 valvas, y también se contaron con datos geoquímicos. Las variables utilizadas fueron las 14 especies de diatomeas más abundantes, así como las dos especies oligohalobias (*Cocconeis disculus* y *Fragilaria crotonensis*) y los elementos Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Sr y Ti.

El DCA separa en tres grupos a las variables estudiadas (Figura 16). En el Grupo 1 se encuentran la mayoría de las variables, incluyendo las diatomeas *Paralia sulcata*, *Dimeregramma minor* y *Nitzschia granulata*, así como la totalidad de los elementos analizados. En el Grupo 2 se localiza *Thalassiosira eccentrica*, única diatomea plactónica identificada en este estudio. En el Grupo 3, se observan las diatomeas *Nitzschia compressa* y *Plagiogramma tessellatum*.

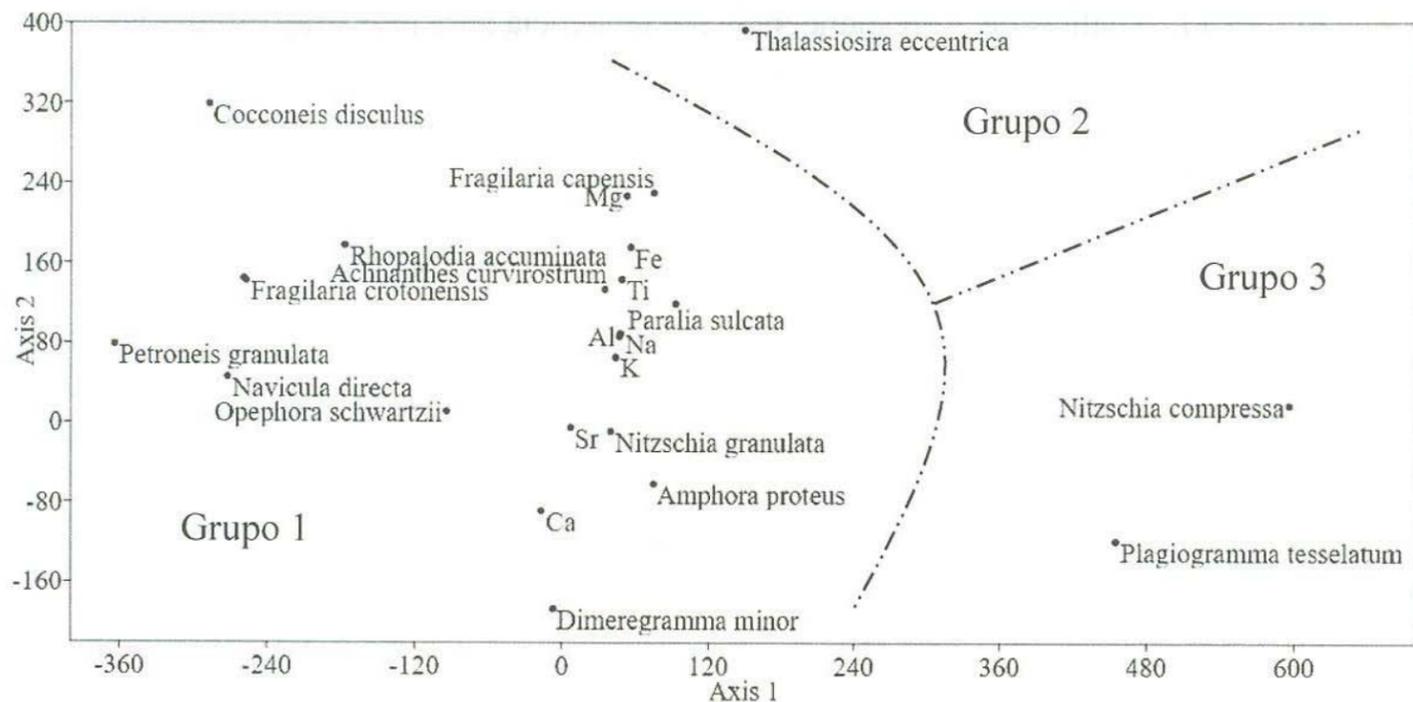


Figura 16. Análisis de correspondencia sin tendencia para variables estudiadas.

En cuanto a las muestras, el DCA separa también en tres grupos a las muestras incluidas en este análisis estadístico. El Grupo 1 contiene a la mayoría de las muestras, UEK-200, UEK-180, UEK-160, UEK-150, UEK-140, UEK-130, UEK-120 y UEK-60. El Grupo 2 presenta las muestras UEK-100 y UEK-80. Por último, el Grupo 3 contiene una única muestra, UEK-20, la más reciente en el análisis.

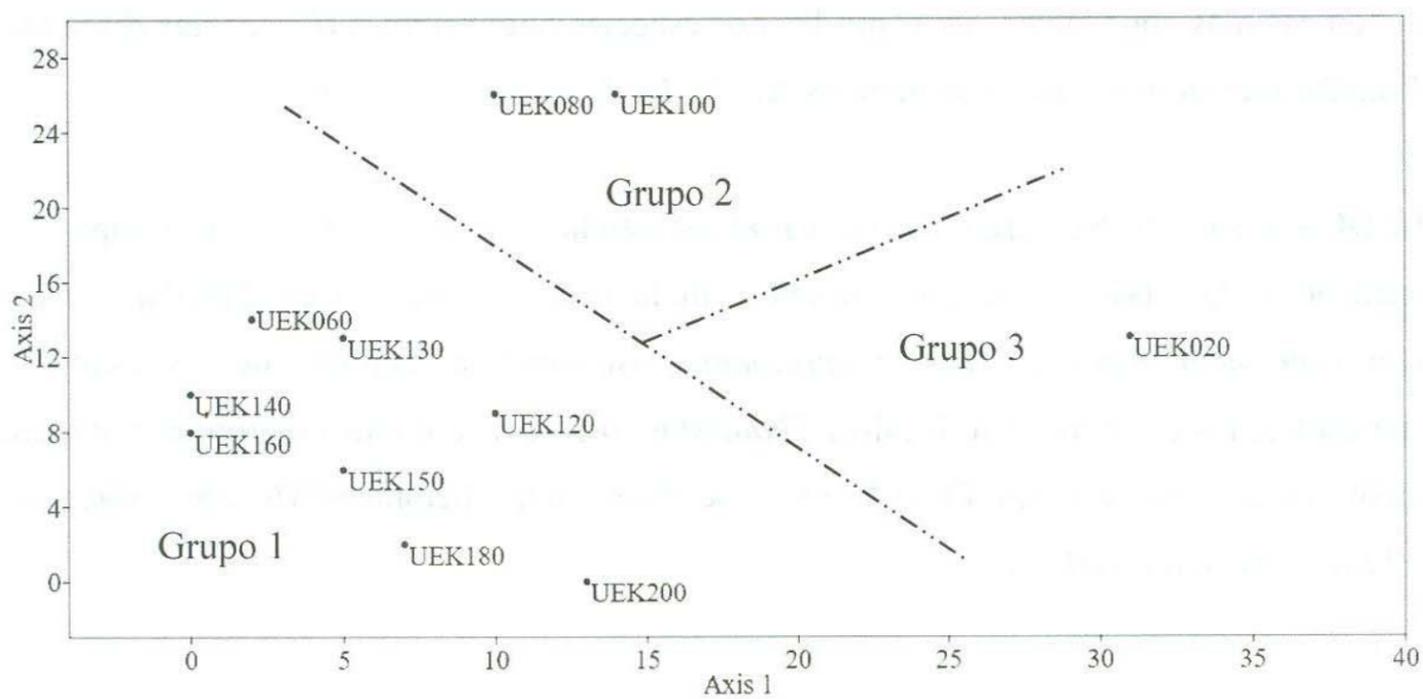


Figura 17. Análisis de correspondencia sin tendencia para muestras estudiadas.

IX. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el análisis geoquímico y de diatomeas fósiles llevados a cabo en el núcleo UEK (Figura 18), permiten reconstruir las características de los ambientes de depositación del pasado de la Laguna La Cruz sucedidos durante los últimos 2,800 años cal. AP; así como también, inferir las condiciones climáticas que prevalecieron en la región de la costa central de Sonora durante el mismo periodo.

9.1 Indicadores paleohidrológicos

En este estudio, las concentraciones de Al, Sr y los valores calculados de CIA son utilizados para documentar las variaciones en las condiciones paleohidrológicas del sitio. El CIA estima la alteración química de los sedimentos y se utiliza como un indicador del grado de interacción agua-sedimento en la cuenca (Roy et al., 2015). Los valores calculados de CIA son muy bajos, según Nesbitt y Young (1984, 1989) se clasifican como muestras en las que los procesos de meteorización no se han desarrollado, sin embargo dos muestras localizadas en la parte central del núcleo (UEK-100 y UEK-80) se encuentran cercanas al límite de la clasificación de baja meteorización (Nesbitt y Young, 1984, 1989).

La concentración de Al presenta el mayor coeficiente de determinación con pendiente positiva ($R^2 = 0.8277$), por lo que es utilizado como índice de escorrentía para los sedimentos del núcleo UEK, mientras que la concentración de Sr presenta el mayor coeficiente de determinación con pendiente negativa ($R^2 = 0.8520$), por lo cual es utilizado como índice de salinidad.

El índice de escorrentía (Al) refleja la contribución de material detrítico hacia la cuenca, su incremento refleja condiciones de mayor humedad. Por el contrario, el índice de salinidad (Sr) representa el incremento de la salinidad del agua, y por lo tanto, se interpreta como periodos de mayor evaporación y condiciones más secas al interior de la cuenca (Roy et al., 2015).

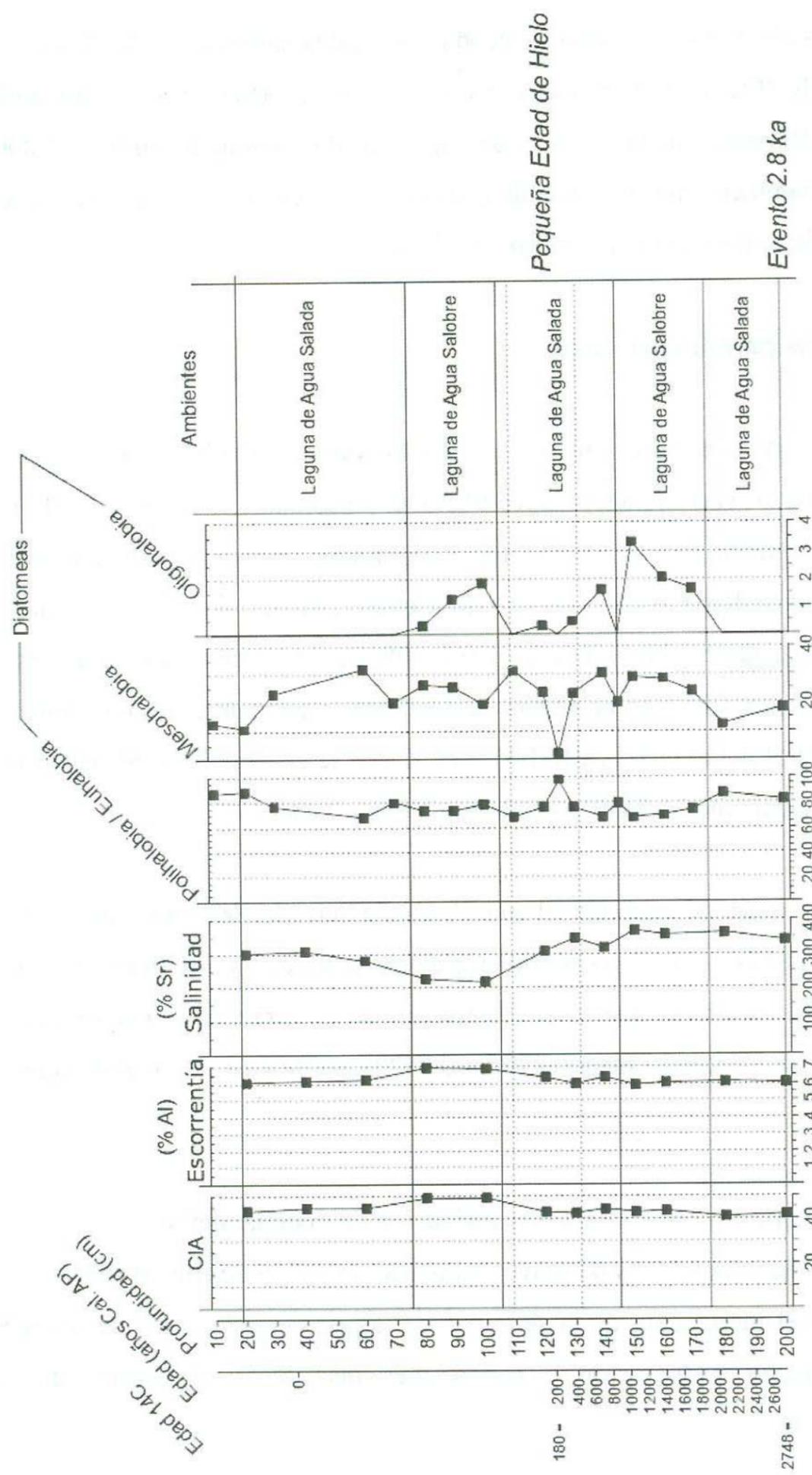


Figura 18. Reconstrucción de ambientes pasado de la Laguna La Cruz

9.2 Indicadores paleoecológicos

El uso de diatomeas en las reconstrucciones paleoambientales se basa en la premisa que las condiciones en las que vivían las especies en el presente son análogas a las condiciones en las que vivían en el pasado (Tobón Velázquez, 2015); por lo tanto, para realizar la reconstrucción de los ambientes pasados es necesario conocer la ecología actual de las especies de diatomeas identificadas en el registro (Apéndice III), para definir las condiciones ambientales que indica cada una de ellas.

Para estimar el índice de salinidad a partir de diatomeas se utiliza el espectro de salinidad propuesto por Lowe (1974; Tabla 4). Las especies marinas pertenecen a la categoría diatomeas euhalobias, las especies de aguas salobres a la categoría de diatomeas mesohalobias y las especies de agua dulce a la categoría de diatomeas oligohalobias.

Tabla 4. Espectro de salinidad (Lowe, 1974)

Categoría	Salinidad (mg/L)
Polihalobias	> 40,000
Euhalobias	30,000 – 40,000
Mesohalobias	500 – 30,000
α	10,000 – 30,000
β	500 – 10,000
Oligohalobias	< 500

La especie *Paralia sulcata*, la más abundante en el presente estudio, es una diatomea que se encuentra comúnmente en el plancton y en el bentos de los ambientes costeros (McQuoid y Nordberg, 2003), al igual que la mayoría de las especies identificadas en el presente estudio, incluidas *Dimeregramma minor* y *Nitzschia granulata*, las dos especies que le siguen en abundancia a *Paralia sulcata*, son comunes en ambientes lagunares en el Golfo de California (Siqueiros Beltrones et al., 2010, 2014, 2015, 2017).

Es notable la presencia de *Thalassiosira eccentrica* en el registro del núcleo UEK, cuyo género es un componente importante de las poblaciones fitoplanctónicas en ambientes marinos pelágicos (Hoppenrath et al., 2007). En los ambientes costeros, *Thalassiosira spp.* se desarrollan en sitios con profundidades entre 2 y 3 m (Hoppenrath et al., 2007).

La ocurrencia de *Cocconeis disculus* y *Fragilaria crotonensis*, aunque su presencia se encuentra en porcentajes muy bajos, es de suma importancia para el estudio debido a que son especies que se desarrollan en ambientes de agua dulce. *Cocconeis disculus* es una especie característica en el bentos de ambientes de agua dulce (Witak, 2013). *Fragilaria crotonensis* es una especie planctónica, común en lagos de agua dulce, con valores bajos en nutrientes como sílice y nitrógeno (Bailey-Watts, 1986).

9.3 Reconstrucción paleoambiental

A partir de los resultados de los distintos análisis realizados en el núcleo UEK, se proponen cinco fases de cambios ambientales en la Laguna La Cruz. En estas fases identificadas se observa una repetición cíclica, en donde el agua de la laguna presenta mayor salinidad y posteriormente condiciones de menor salinidad.

La primera fase ambiental ocurre entre 2,800 y 1,900 años cal. AP, en ella se desarrollan de manera abundante las diatomeas euhalobias/polihalobias (*Paralia sulcata* especie dominante), con un índice de escorrentía y CIA bajos. Para esta primera fase se propone un ambiente lagunar costero de aguas predominantemente marinas y condiciones de baja humedad (Figura 19A).

La segunda fase ambiental se desarrolla entre 1,900 y 900 años cal. AP, cuando el registro de diatomeas euhalobias/polihalobias disminuyen, mientras que las diatomeas mesohalobias aumentan y se observan las primeras especies oligohalobias. El índice de salinidad y CIA se incrementan levemente. Se propone un ambiente lagunar con aguas salobres y una mayor humedad relativa (Figura 19B).

La tercer fase ambiental ocurre durante la Pequeña Edad de Hielo (~ entre 900 y 150 años cal. AP), se trata de un episodio con importantes oscilaciones en el contenido de diatomeas con características ecológicas de distintas preferencias en salinidad. Durante este periodo dominan las diatomeas euhalobias/polihalobias, y se observa cierta estabilidad en los valores de CIA e índice de escorrentía, mientras que el índice de salinidad cae bruscamente al final de este periodo. Se estima que las características ambientales son similares a la primera fase ambiental, con el desarrollo de una laguna costera con aguas predominantemente marinas y una disminución en la humedad ambiental (Figura 19C).

La cuarta fase ambiental tiene lugar entre 150 y 80 años cal. AP, se incrementa el contenido de diatomeas mesohalobias y oligohalobias, se observa los mayores valores para el índice de escorrentía y CIA, mientras que el índice de salinidad baja considerablemente. En esta etapa se desarrolla una laguna de agua salobre y se estima que las condiciones climáticas presentan la mayor humedad ambiental de este registro (Figura 19D).

La quinta fase ambiental inició hace aproximadamente 80 años cal. AP y ha perdurado hasta la actualidad. En esta etapa, de manera general, dominan las especies euhalobias/polihalobias sobre las especies mesohalobias, y desaparecen por completo las especies oligohalobias, es importante la presencia de *Thalassiosira eccentrica* en esta etapa, ya que su presencia nos indica una mayor profundización de la laguna. El índice de salinidad aumenta, mientras que el índice de escorrentía y el CIA caen levemente. Se estima un ambiente lagunar de mayor profundidad con dominancia de aguas marinas y condiciones secas (Figura 19E).

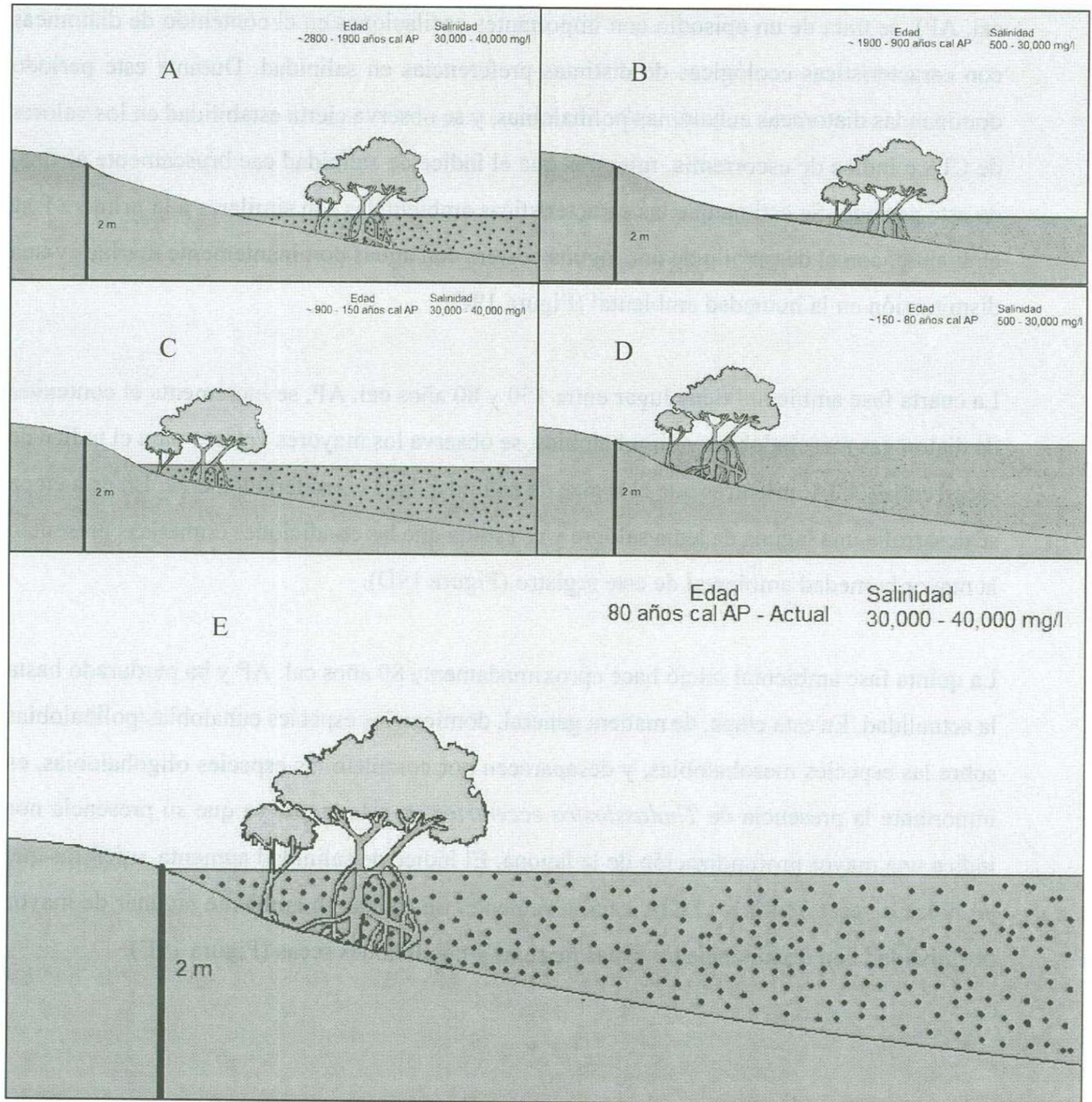


Figura 19. Fases ambientales de la Laguna La Cruz durante los últimos 2,800 años.

X. CONCLUSIÓN

El presente estudio de los sedimentos de La Laguna La Cruz evidencia los cambios ambientales ocurridos en los últimos 2,800 años. La diversidad de flora de diatomeas fue de 70 taxones, en su mayoría con registros actuales en lagunas costeras del Golfo de California, siendo las más importantes por su abundancia relativa *Paralia sulcata*, *Dimeregramma minor* y *Nitzschia granulata*, así como *Thalassiosira eccentrica*, por ser la única especie marina de forma de vida planctónica identificada, y *Cocconeis disculus* y *Fragilaria crotonensis*, por ser diatomeas afines a ambientes de agua dulce.

El registro sedimentario de diatomeas euhalobias/polihalobias es similar al registro de Sr, elemento considerado como índice de salinidad, relacionado con condiciones ambientales secas. Por otra parte, el registro de diatomeas oligohalobias es análogo a los resultados del cálculo del CIA y a los valores observados de Al, este último utilizado como índice de escorrentía, y por lo tanto para inferir condiciones ambientales húmedas.

Con la información y análisis de estos resultados, se identificaron cinco fases ambientales desarrolladas durante los últimos 2,800 años en la Laguna La Cruz. La primera fase ocurre hace 2,800 años, como una laguna somera dominada por aguas marinas. Hace 1,900 años se presentan condiciones de mayor humedad, disminuyendo la salinidad de la laguna. Durante la Pequeña Edad de Hielo, disminuye la humedad ambiental y se incrementa la salinidad de la laguna. Hace 150 años la laguna se profundiza ligeramente, la humedad ambiental aumenta, disminuyendo la salinidad de la laguna. Finalmente, se establecen las condiciones ambientales actuales de la Laguna La Cruz hace 80 años cal. AP, un ambiente lagunas dominado por aguas marinas y una mayor profundidad en comparación al resto de las fases identificadas.

Literatura citada

- Bailey-Watts, A.E. 1986. The ecology of planktonic diatoms, especially *Fragilaria crotonensis*, associated with artificial mixing of a small Scottish loch in summer, *Diatom Research*, 1:2, 153-168, DOI:10.1080/0269249X.1986.9704966.
- Barber, K.E., Chambers, F.M., Maddy, D. 2004. Late Holocene climatic history of northern Germany and Denmark: peat macro-fossil investigations at Dosenmoor, Schleswig-Holstein, and Svanemose, Jutland. *Boreas* 33, 132–144.
- Battarbee, R.W. 1991. Recent paleolimnology and diatom – based environmental reconstruction. In *Quaternary Landscapes*. pp. 129 – 174. University of Minnesota Press. Minneapolis.
- Battarbee, R.W., Mason, J., Renberg, I. y Talling, J.F. 1990. *Paleolimnology and Lake Acidification*. Cambridge University Press. Cambridge. 219 p.
- Battarbee RW, Jones VJ, Flower RJ, Cameron NG, Bennion H, Carvalho L, Juggins S 2001. Diatoms. In: *Tracking environmental change using lake sediments Vol 3: Terrestrial, algal and siliceous indicators*. (eds Smol JP, Birks HJB, Last W) pp 155-202. Dordrecht, Kluwer.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., et al. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science* 278, 1257–1266.
- Brands, S.J. (ed.), 1989-present. *The Taxonomicon*. Universal Taxonomic Services, Zwaag, The Netherlands. [<http://taxonomicon.taxonomy.nl/>]
- Brasier, M.D. 1980. *Microfossils*. George Allen & Unwin. London y Boston. 193 p.
- Brusca, R. C., Cudney Bueno, R., Moreno Báez, M., 2006. *Gulf of California Esteros and Estuarios Analysis, State of Knowledge and Conservation Priority Recommendations*. Final Report to the David and Lucide Packard Foundation by the Arizona-Sonora Desert Museum, 60 p.
- Caballero, M., Peñalba, M. C., Martínez, M., Ortega Guerrero, B., Vázquez, L., 2005. A Holocene record from a former coastal lagoon in Bahía Kino, Gulf of California, México. *The Holocene*, 15 (8), 1236-1244.

- Chambers, F.M., Mauquoy, D., Brain, S.A., et al. 2007. Globally synchronous climate change 2800 years ago: proxy data from peat in South America. *Earth and Planetary Science Letters* 253, 439–444.
- Charman, D.J., Bludell, A., Chiverell, R.C., et al. 2006. Compilation of non-annually resolved Holocene proxy climate records: stacked Holocene peatland palaeo-water table reconstructions from northern Britain. *Quaternary Science Reviews* 25, 336–350.
- Cohen, K.M., Finney, S.M., Gibbard, P.L., Fan, J.-X., 2013. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36, 199-204. www.episodes.org
- Crowley T.J., Lowery, T.S. 2000. How warm was the Medieval Warm Period? *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 29, 51–54.
- De la O Villanueva, M. y Villalba Atondo, A. I., 1984. Estudio sedimentológico interior y geología aledaña de la laguna costera La cruz, Bahía Kino, Sonora y su relación con la distribución de organismos bentónicos (bivalvos). Tesis de Licenciatura, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 104 p.
- Fagan, B. 2000. *The Little Ice Age*. Basic Books, New York. 232 p.
- Galindo – Quijada, J. R., 2018. Estudio sedimentológico de un núcleo litoral de la Laguna la Cruz, Sonora, México. Tesis profesional, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, 59 p.
- Gasse, F., 1980, *Les Diatomees Lacustres Plio-Pleistocenes du Gadeb (Ethipie) Systematique, Paleoecoloie, Biostratgraphie, Francia*, p. 249
- Gauch, H. G. J., 1982. *Multivariate analysis in community ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, 298 p.
- Grethe R. Hasle; Erik E. Syvertsen; Karen A. Steidinger; Karl Tangen, Carmelo R. Tomas. 1996. *Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates*. Academic Press. pp. 5-385.
- 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): 1335.
- Grimm, E. C. 1994. *Tilia Graph 2.0.41*. Illinois State Museum, Springfield, Estados Unidos de América. 291 – 311 p.
- Grove, J.M. 1988. *The Little Ice Age*. Routledge, London. 498 p.

- Guiry, M.D. & Guiry, G.M. 2018. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 01 November 2018.
- Hammer O., Harper, D. A. T., Ryan, P. D., 2001. PAST: Paleontological Statistic software package for education and data analysis. *Paleontología Electrónica* 4 (1), 9 p.
- Hannah, D., 2008. Community vegetation mapping of Estero Santa Cruz. Plant ecology class, Prescott College Center for cultural and ecological studies, Bahía Kino, Sonora.
- Holmgren, K., Tyson, P.D., Moberg, A., et al. 2001. A preliminary 3000-year regional temperature reconstruction for South Africa. *South African Journal of Science* 97, 49-51.
- Jiménez – Marce, R., 2012. *La Pequeña Edad de Hielo. Cómo el clima afectó a la historia de Europa*. 13001850, Barcelona, Gedisa, 2008, 344 p.
- Jones, 2007. Diatom Introduction, University College London, UK, Elsevier B.V., 476-484.
- Jordan, R. W., Stickley, C. E., 2010. Diatoms as indicators of paleoceanographic events, *Cap. 22: 424-453*. En: Smol, P. J., Stoemer, E. F. eds. *The Diatoms: Applications for the Enviromental and Earth Sciences*. 686 p. Cambridge University Press.
- Jowsey, P., 1996. An improved peat sampler. *New Phytol* 66: 245-248.
- Knudsen, M.F., Riisager, P., Jacobsen, B.H., et al. 2009. Taking the pulse of the sun during the Holocene by joint analysis of ^{14}C and ^{10}Be . *Geophysical Research Letters* 36, doi: 10.1029/2009 GL039439
- Lankford, R. R., 1997, Coastal lagoons of Mexico-their origins and clasification, in Wiley, M. L., ed., *Estuarine Processes: Nueva York, Academic Press*, t. 2, p. 182-215.
- Licea-Duran, S. 1971. *Sistemática y distribución de diatomeas de la Laguna de Agiabampo, Son./Sin., México*. Centro de ciencias del mar y limnología, 34 p.
- Lowe, J.J. y Walker, M.J.C. 2015: *Reconstructing Quaternary Environments*. Longman, London, 538 p.
- Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K. 1998. Global-scale tem perature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392, 779–787.
- McQuoida M.R., Nordbergb. K., 2002. The diatom *Paralia sulcata* as an environmental indicator species in coastal sediments. *ELSEVIER*, volume 56, Issue 2, P. 339-354.

- Mejía-Rodríguez, D.M. 2011. Diatomeas perifíticas y algunas características limnológicas de un humedal urbano en la sabana de Bogotá. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 96 p.
- Meltzer, 2012. Land Use Description of Estero Santa Cruz. Prescott College Centro de Estudios Culturales y Ecologicos, Bahía Kino, Sonora.
- Metcalf, S. E., Nash, D. J., 2012. Quaternary environmental change in the Tropics. Willey-Blackwell, 436 p.
- Mona Hoppenrath , Bank Beszteri , Gerhard Drebes , Hannelore Halliger , Justus E. E. Van Beusekom , Silvia Janisch & Karen H. Wiltshire, 2007. *Thalassiosira* species (Bacillariophyceae, Thalassiosirales) in the North Sea at Helgoland (German Bight) and Sylt (North Frisian Wadden Sea) – a first approach to assessing diversity, *European Journal of Phycology*, 42:3, 271-288, DOI: 10.1080/09670260701352288
- Monreal, R., Castillo, J., Rangel, M. Morales, M., Oroz, L.A., y Valenzuela, H., 2001, La intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora, en Corona-Esquivel, R y Gómez-Godoy, J., (eds.), Acta de Sesiones de la XXIV Convencion Internacional de la Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de Mexico A.C., Acapulco Guerrero, 17-20 de octubre del 2001, p. 93-98.
- Najman, Y., 2006, The detrital record of orogenesis: a review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basin: *Earth Sciences Reviews*, 74, 1–72.
- Navarro, J.C., 1989. Estratigrafía del Cretácico Inferior en el área de Santa Ana, Sonora, México: Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, Tesis profesional, 90 p.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1523-1534.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1989, Formation and diagenesis of weathering profiles: *Journal of Geology*, 97, 129-147.
- Oppenheimer, C. 2011. Eruptions that Shook the World. Cambridge University Press, Cambridge. 392 p.

- Peña-Maldonado, A.I., 2011. Estudio de propiedades elásticas de nanofibras adhesivas de diatomeas *Nitzschia* spp. Tesis de maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, S.L.P. 97 p.
- Pielou, E.C., 1984. The interpretation of ecological data; a primer on classification and ordination. John Willey & Sons, Nueva York, 263 p.
- Pollack, H.N., Huang, S., Smerdon, J.E. 2006. Five centuries of climate change in Australia: the view from underground. *Journal of Quaternary Science* 21, 701–706.
- Red de Herbarios del Noroeste, 2018. Flora del Noroeste de México. <http://herbanwmex.net/portal/checklists/dynamicmap.php?interface=checklist>.
- Rhodes, R.H., Bertler, N.A.N., Baker, J.A. 2012. Little Ice Age climate and oceanic conditions of the Ross Sea, Antarctica from a coastal ice core record. *Climate of the Past* 8, 1223–1238.
- Round, F.E., Crawford, R.M. y Mann D.G. 1990. *The Diatoms Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge University Press. 747 p.
- Sancetta, C., Villareal, T., y Falkowski, P. 1991. Massive fluxes of Rhizosolenid diatoms. *Paleoceanography*, 1: 163 – 180.
- SGM, 2000. Carta Geológico-Minera, Sierra Libre H12-11, escala 1:250000. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/19_H12-11_GM.pdf.
- Siqueiros-Beltrones, D. A., Navarro, J. N., López-Fuerte, F. O., 2010 Benthic diatoms associated with mangrove environments in the northwest region of México. México. CICIMAR-Oceánides, 206 p.
- Siqueiros-Beltrones, D. A., Argumedo-Hernández, U. 2014. Diatomeas epifitas consumidas por adultos de abulón (*Haliotis* spp.) en Baja California Sur, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86, 111-122.
- Siqueiros Beltrones D. A., U. Argumedo Hernández and C. Landa Cancigno. 2015. Uncommon species diversity values in epiphytic diatom assemblages of the kelp *Eisenia arborea*. *Hidrobiológica* 26 (1): 61-76.
- Siqueiros-Beltrones, D. A., Argumedo-Hernández, U., López-Fuerte. 2017. Diversity of benthic diatoms in the Guerrero Negro Lagoon (El Vizcaíno Biosfere Reserve), Baja California Península, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 21-35.

- SMN. 2018. Información Climatológica por Estado. <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=son>
- Smol, P. J., Stoermer, E. F. 2010. *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press. 686.
- Steinhilber, F., Abreu, J.A., Beer, J., et al. 2012. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, doi: 10.1073/pnas.1118965109.
- Stoermer EF, Smol JP 1999 Applications and uses of diatoms: prologue. *The diatoms: applications for the environmental and earth sciences*, 3-10 p.
- Swindles, G.T., Plunkett, G., Roe, H. 2007. A delayed climatic response to solar forcing at 2800 cal. BP: multiproxy evidence from three Irish peatlands. *The Holocene* 17, 177–182.
- 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, Ciudad Universitaria, D.F, 71 p.
- Tomas, R.C. 1997. *Identifying marine phytoplankton*. Academic Press, Florida Marine Research Institute. St. Petersburg, Florida. 858 p.
- Van Geel, B., Bokovenko, N.A., Burova, N.D., et al. 2004. Climate change and the expansion of the Scythian culture after 850 BC, a hypothesis. *Journal of Archaeological Science* 31, 1735-1742.
- Villareal, T.A., Altabet, M.A. y Culver-Rymsza, K. 1993. Nitrogen transport by vertically migrating diatom mats in the North Pacific Ocean. *Nature*, 363: 709 – 712.
- Witak, M. 2013. Diatom biofacies in the SW Gulf of Gdańsk and the Vistula Lagoon (the southern Baltic Sea) as indicators of the basin evolution in the Middle and Late Holocene. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 42 (1), Pages 70-88, DOI: <https://doi.org/10.2478/s13545-013-0052-4>.
- Witton E., Malmgren, B., Witkowski A., Kuijpers A., 2006 . Holocene marine diatoms from the Faeroe Islands and their paleoceanographic implications. *ELSEVIER*, Volume 239, Issues 3 -4, 487-509 p.

Winkler, S. 2000. The 'Little Ice Age' maximum in the Southern Alps, New Zealand: preliminary results at Mueller Glacier. *The Holocene* 10, 643-647.

WoRMS Editorial Board. 2018. World Register of Marine Species. <http://www.marinespecies.org>.

APÉNDICE I. Concentración de elementos en el núcleo UEK.

Muestra	Al (%)	Ca (%)	Fe (%)	K (%)	Mg (%)	Na (%)	Sr (ppm)	Ti (%)
UEK-20	6.07	2.13	1.97	3.11	0.72	2.58	303	0.14
UEK-40	6.17	1.85	1.58	3.11	0.72	2.60	309	0.13
UEK-60	6.24	1.85	1.83	3.15	0.89	2.63	282	0.15
UEK-80	6.93	1.10	2.82	3.00	1.72	3.11	227	0.24
UEK-100	6.89	1.03	2.72	3.18	1.58	3.09	216	0.24
UEK-120	6.33	2.26	1.99	3.16	1.05	2.74	309	0.17
UEK-130	5.95	2.55	2.59	3.10	1.03	2.59	348	0.15
UEK-140	6.37	1.90	2.12	3.22	1.02	2.77	319	0.18
UEK-150	5.89	3.11	1.57	2.95	0.59	2.51	369	0.15
UEK-160	6.01	2.55	1.53	3.16	0.59	2.43	357	0.13
UEK-180	6.12	3.26	1.63	3.12	0.87	2.85	362	0.18
UEK-200	6.03	2.57	1.30	3.08	0.59	2.67	342	0.15

APÉNDICE II. Listado taxonómico.

Dominio Eukaryota Chatton

Reino Chromista Cavalier-Smith

División Bacillariophyta Engler & Gilg (1924)

Clase Coscinodiscophyceae Round & Crawford (1990)

Orden Thalassiosirales Glezer & Makarova (1986)

Familia Thalossiosiraceae Lebour (1930)

Género *Thalossiosira* Cleve (1873)

Thalossiosira eccentrica Cleve (1904)

Familia Sthephanodiscaceae Glezer & Makarova (1986)

Género *Cyclotella* (Kützing) Brébisson (1838)

Cyclotella litoralis Lange & Syvertsen (1989)

Orden Melosirales Crawford (1990)

Familia Stephanopyxidaceae Nikolaev (1984)

Género *Stephanopyxis* (Ehrenberg) Ehrenberg (1845)

Stephanopyxis palmeriana (Greville) Grunow (1884)

Orden Paraliales Crawford (1990)

Familia Paraliaceae Crawford (1988)

Género *Paralia* Heiberg (1863)

Paralia sulcata Cleve (1873)

Orden Coscinodiscles Round & Crawford (1990)

Familia Coscinodiscaceae Kützing (1844)

Género *Coscinodiscus* Ehrenberg (1839)

Coscinodiscus apiculatus Ehrenberg (1844)

Familia Heliopeltaceae Smith (1872)

Género *Actinoptychus* Ehrenberg (1839)

Actinoptychus cathedralis Brun (1890)

Actinoptychus hexagonus Grunow (1874)

Orden Triceratiales Round & Crawford (1990)

Familia Triceratiaceae Lemmerm. (1899)

Género *Cerataulus* Ehrenberg (1843)

Cerataulus californicus Schmidt (1888)

Género *Auliscus* Ehrenberg (1843)

Auliscus sculptus (Smith) Brightwell (1860)

Genero *Pleurosira* Ehrenberg (1843)

Pleurosira laevis Ehrenberg (1861)

Familia Plagiogrammaceae De Toni (1890)

Género *Plagiogramma* Greville (1890)

Plagiogramma interruptum (Gregory) Pritchard (1861)

Plagiogramma rhombicum Hustedt

Plagiogramma tessellatum Greville (1859)

Plagiogramma wallichianum Greville (1865)

Género *Dimmeregrama* Ralfs (1861)

Dimmeregrama minor (Gregory) Ralfs (1861)

Orden Biddulphiales Krieger (1954)

Familia Biddulphiaceae Kützing (1844)

Género *Biddulphia* Gray (1821)

Biddulphia tridens Ehrenber (1841)

Orden Anaulales Round & Crawford (1990)

Familia Anaulaceae Lemmerm. (1899)

Género *Eunotogramma* Weisse (1854)

Eunotogramma laevis (Grunow) Cleve & Möller (8179)

Orden Rhizosoleniales Silva (1962)

Familia Rhizosoleniaceae De Toni (1890)

Género *Rhizosolenia* Brightwell (1858)

Rhizosolenia bergonii Peragallo (1892)

Clase Fragilariophyceae Round (1990)

Orden Fragilariales Silva (1962)

Familia Fragilariaceae Grev. (1833)

Género *Fragilaria* Lyngbye (1819)

Fragilaria capensis Grunow (1863)

Fragilaria crotonensis Kitton (1869)

Género *Opephora* Petit (1888)

Opephora schwartzii (Grunow) Pelletan (1889)

Orden Licmophorales Round (1990)

Familia Licmophoraceae Kützing (1844)

Género *Licmophora* Agardh (1827)

Licmophora abbreviata Agardh (1831)

Orden Thalassionematales Round (1990)

Familia Thalassionemataceae Round (1990)

Género *Thalassionema* Perag. (1921)

Familia Rhaponeidaceae Forti

Género *Delphineis* Andrews (1977)

Delphineis fasciola Petit

Orden Striatellales Round (1990)

Familia Striatellaceae Kützing (1844)

Género *Grammatophora* Ehrenberg (1840)

Grammatophora marina Kützing (1844)

Clase Bacillariophyceae Haeckel (1878)

Orden Lyrellales Mann (1990)

Familia Lyrellaceae Mann (1990)

Género *Lyrella* Karajeva (1978)

Lyrella irrorata Mann (1990)

Lyrella lyra Karajeva (1978)

Lyrella Praetexta Mann (1990)

Género *Petroneis* Stickle & Mann (1990)

Petroneis granulata (Mann) Round et al. (1990)

Orden Mastogloiales Mann (1990)

Familia Mastogloiaceae Mareschk (1903)

Género *Mastogloia* Thwaites (1856)

Mastogloia angulata Lewis (1861)

Mastogloia braunii Grunow (1863)

Mastogloia exilis Hustedt (1933)

Mastogloia fallax Foged (1984)

Orden Cymbellales Mann (1990)

Familia Cymbellaceae Grev. (1833)

Género *Encyonema* Kützing (1833)

Orden Achnanthes Silva (1962)

Familia Achnantheaceae Kützing (1844)

Género *Achnanthes* Bory (1822)

Achnanthes angustata Greville (1859)

Achnanthes curvirostrum Brun (1895)

Achnanthes giovanica (Grunow) Cleve & Grunow (1880)

Achnanthes yaquinensis McIntire & Reimer (1974)

Familia Cocconeidaceae Kützing (1844)

Género *Cocconeis* Ehrenberg (1838)

Cocconeis disculus (Cleve) Cleve & Jentzsch (1882)

Cocconeis scutellum Ehrenberg (1838)

Orden Naviculales Bessey (1907)

Familia Sellaphoraceae Mareschk. (1902)

Género *Fallacia* Stickle & Mann (1990)

Fallacia forcipata Stickle & Mann (1990)

Fallacia hummii Mann (1990)

Fallacia nummularia Mann (1990)

Familia Pinnulariaceae Mann (1990)

Género *Pinnularia* Ehrenberg (1843)

Pinnularia yarrensii (Grunow) Jurilj (1957)

Familia Diploneidaceae Mann (1990)

Género *Diploneis* (Ehrenberg) Cleve (1894)

Diploneis crabro (Ehrenberg) (1854)

Familia Naviculaceae Kützing (1844)

Género *Navicula* Bory (1822)

Navicula cancellata Donkin (1972)

Navicula directa (Smith) Pritchard (1861)

Navicula meniscoides Hustedt (1955)

Navicula peregrina (Ehrenberg) Kützing (1844)

Navicula spectabilis Gregory (1857)

Familia Pleurosigmataceae Mereschk. (1903)

Género *Gyrosigma* Hassall (1845)

Gyrosigma balticum (Ehrenberg) Rabenhorst (1853)

Gyrosigma eximium (Thwaites) Boyer (1927)

Orden Thalassiophysales Mann (1990)

Familia Catenulaceae Mereschk. (1902)

Género *Amphora* Ehrenberg (1840)

Amphora angusta Gregory (1857)

Amphora arenicola (Grunow) Cleve (1895)

Amphora ostrearia (Brébbison) Kützing (1849)

Amphora proteus Gregory (1857)

Amphora spectabilis Gregory (1857)

Amphora terroris Gregory (1853)

Amphora ventricosa Gregory (1857)

Orden Bacillariales Hendey (1937)

Familia Bacillariaceae Ehrenberg (1831)

Género *Bacillaria* Gmel. (1788)

Bacillaria socialis (Gregory) Pritchard (1861)

Género *Psammodictyon* Mann (1990)

Psammodictyon panduriforme Round et al. (1990)

Género *Nitzschia* Hassall (1845)

Nitzschia lorenziana (Grunow) Cleve & Möller (1879)

Nitzschia compressa (Bailey) Boyer (1916)

Nitzschia fluminensis Grunow (1862)

Nitzschia granulata Grunow (1880)

Nitzschia longissima (Brébisson) Pritchard (1861)

Nitzschia sigma (Kützing) W. Smith (1853)

Familia Rhopalodiales (Karsten) Topachevs'kyj & Oksiyuk (1960)

Género *Rhopalodia* Müller (1895)

Rhopalodia accuminata (Kramm.) Kramm. & L-B (1987)

Rhopalodia gibberula (Ehrenberg) Müller (1895)

Rhopalodia musculus (Kützing) Müller (1900)

Orden Surirellales Mann (1990)

Familia Surirellaceae Kützing (1844)

Género *Stenopterobia* (Brébisson) Van Heurck (1896)

Género *Surirella* Turpin (1828)

Surirella febigeri Lewis (1861)

Surirella turgida Smith (1853)

APÉNDICE III. Ecología de diatomeas.

Taxón	Forma de vida	Salinidad
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	Planctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Bacillaria socialis</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Bidulphia tridens</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Cyclotella litoralis</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Grammatophora marina</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Licmophora abbreviata</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Navicula cancellata</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Nitzschia granulata</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Paralia sulcata</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Stephanopyxis palmeriana</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Cerataulus californicus</i>	Ticoplanctónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Coscinodiscus apiculatus</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Achnanthes angustata</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Actinoptychus cathedralis</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Actinoptychus hexagonus</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Amphora angusta</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Amphora arenicola</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Amphora ostrearia</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Amphora spectabilis</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Amphora ventricosa</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Auliscus sculptus</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Delphineis fasciola</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Dimeregramma minor</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Eunotogramma laevis</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Fallacia forcipata</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Fallacia nummularia</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Lyrella irrorata</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Lyrella lyra</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Lyrella praetexta</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Mastogloia angulata</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Mastogloia fallax</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Navicula directa</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Navicula spectabilis</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Nitzschia compressa</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Nitzschia fluminensis</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Nitzschia longissima</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Opephora schwartzii</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia

Taxón	Forma de vida	Salinidad
<i>Petronéis granulata</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Plagiogramma interruptum</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Plagiogramma rhombicum</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Plagiogramma tessellatum</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Plagiogramma wallichianum</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Psammodictyon panduriforme</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Rhizosolenia bergonii</i>	Bentónica	Euhalobia/Polihalobia
<i>Nitzschia lorenziana</i>	Ticoplanctónica	Mesohalobia
<i>Nitzschia sigma</i>	Ticoplanctónica	Mesohalobia
<i>Stenopterobia sp.</i>	Ticoplanctónica	Mesohalobia
<i>Achnanthes curvirostrum</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Achnanthes javanica</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Achnanthes yaquinensis</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Amphora proteus</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Amphora terroris</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Cocconeis scutellum</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Diploneis crabro</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Encyonema sp.</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Fallacia hummii</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Fragilaria capensis</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Gyrosigma balticum</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Gyrosigma eximium</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Hantzschia amphioxys</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Mastogloia braunii</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Mastogloia exilis</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Navicula meniscoides</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Navicula peregrina</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Pinnularia yarrensis</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Pleurosira laevis</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Rhopalodia accuminata</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Rhopalodia gibberula</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Rhopalodia musculus</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Surirella febigeri</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Surirella turgida</i>	Bentónica	Mesohalobia
<i>Cocconeis disculus</i>	Ticoplanctónica	Oligohalobia
<i>Fragilaria crotonensis</i>	Ticoplanctónica	Oligohalobia

APÉNDICE IV. Láminas de diatomeas.

Lamina 1

Figura 1 *Thalassiosira eccentrica* (Diámetro 38 μm)

Figura 2 *Bacillaria socialis* (Longitud 62 μm)

Figura 3 *Cyclotella litoralis* (Diámetro 20 μm)

Figura 4 *Grammatophora marina* (Longitud 55 μm)

Figura 5 *Licmophora abbreviata* (Longitud 93 μm)

Figura 6 *Nitzschia granulata* (Longitud 33 μm)

Figura 7-8 *Paralia sulcata* (Diámetro 30 μm)

Figura 9 *Stephanopyxis palmeriana* (Diámetro 32 μm)

Figura 10 *Cerataulus californicus* (Diámetro 41 μm)

Figura 11 *Achnanthes angustata* (Longitud 73 μm)



1



2



3



4



5



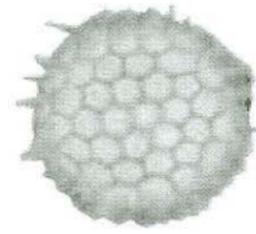
6



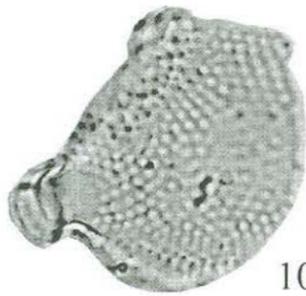
7



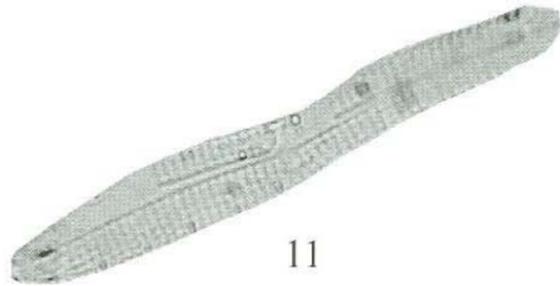
8



9



10



11

Lamina 2

Figura 12 *Actinoptychus hexagonus* (Diámetro 43 μm)

Figura 13 *Amphora arenicola* (Longitud 32 μm)

Figura 14 *Amphora ostrearia* (Longitud 18 μm)

Figura 15 *Amphora spectabilis* (Longitud 23 μm)

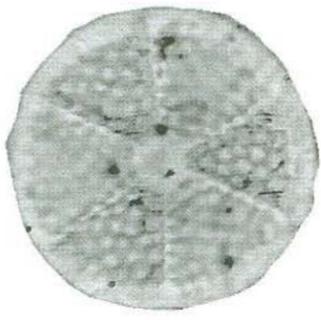
Figura 16 *Amphora ventricosa* (Longitud 39 μm)

Figura 17 *Auliscus sculptus* (Diámetro 45 μm)

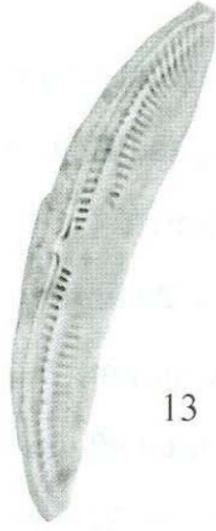
Figura 18 *Coscinodiscus apiculatus* (Diámetro 32 μm)

Figura 19 *Delphineis fasciola* (Longitud 20 μm)

Figura 20 *Dimeregramma minor* (Longitud 25 μm)



12



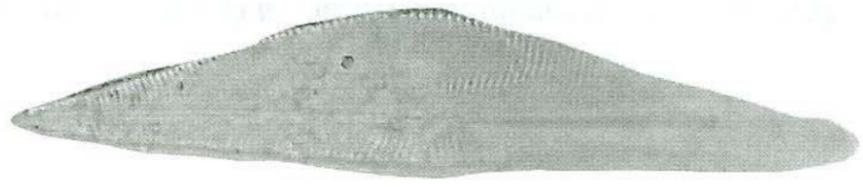
13



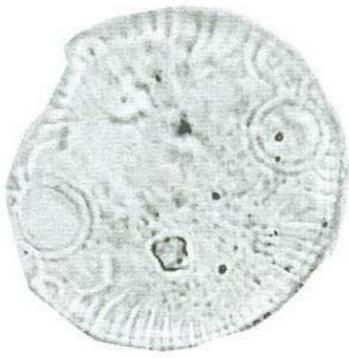
14



15



16



17



18



19



20

Lamina 3

Figura 21 *Eunotogramma laevis* (Longitud 10 µm)

Figura 22 *Fallacia nummularia* (Longitud 30 µm)

Figura 23 *Lyrella lyra* (Longitud 40 µm)

Figura 24 *Mastogloia fallax* (Longitud 20 µm)

Figura 25 *Navicula directa* (Longitud 40 µm)

Figura 26 *Nitzschia longissima* (Longitud 90 µm)

Figura 27 *Opephora schwartzii* (Longitud 22 µm)

Figura 28 *Petroneis granulata* (Longitud 55 µm)

Figura 29 *Plagiogramma tessellatum* (Longitud 18 µm)

Figura 30 *Plagiogramma wallichianum* (Longitud 40 µm)



21



22



23



24



25



26



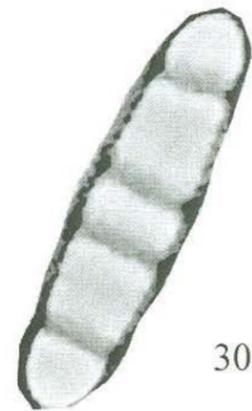
27



28



29



30

Lamina 4

Figura 31 *Psammodictyon panduriforme*(Longitud 46 μm)

Figura 32 *Rhizosolenia bergonii*(Longitud 20 μm)

Figura 33 *Achnanthes curvirostrum*(Longitud 15 μm)

Figura 34 *Achnanthes javanica*(Longitud 60 μm)

Figura 35 *Achnanthes yaquinensis*(Longitud 53 μm)

Figura 36 *Amphora proteus*(Longitud 29 μm)

Figura 37 *Cocconeis scutellum*(Longitud 22 μm)

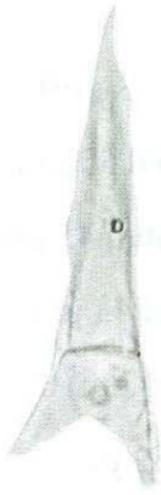
Figura 38 *Diploneis crabro*(Longitud 33 μm)

Figura 39 *Fragilaria capensis*(Longitud 15 μm)

Figura 40 *Gyrosigma balticum*(Longitud 90 μm)



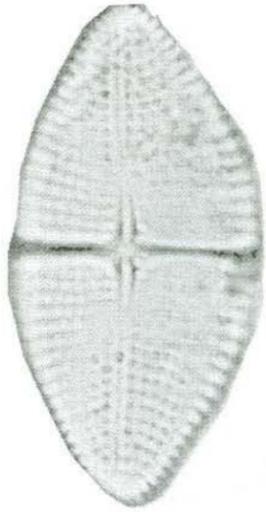
31



32



33



34



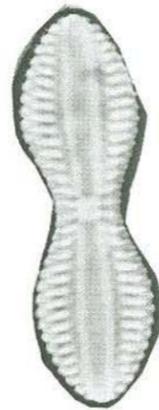
35



36



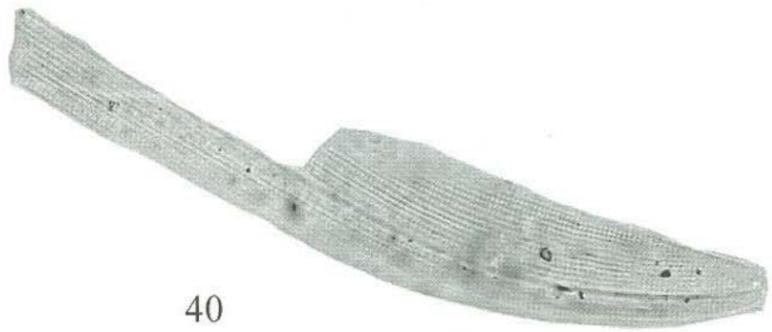
37



38



39



40

66



47

68

Lamina 5

Figura 41 *Gyrosigma eximium* (Longitud 53 μm)

Figura 42 *Hantzschia amphioxys* (Longitud 55 μm)

Figura 43 *Rhopalodia accuminata* (Longitud 45 μm)

Figura 44 *Rhopalodia musculus* (Longitud 43 μm)

Figura 45 *Surirella febigeri* (Longitud 130 μm)

Figura 46 *Cocconeis disculus* (Longitud 52 μm)

Figura 47 *Fragilaria crotonensis* (Longitud 63 μm)

