



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

**Escuela Nacional de Estudios Superiores
Unidad Morelia**

**ESTUDIO PALEOCLIMÁTICO DEL
HOLOCENO EN EL ESTADO DE
JALISCO, CASO DE ESTUDIO DE SAN
JUANITO DE ESCOBEDO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN GEOCIENCIAS
P R E S E N T A:**

PAULINA AÍDA LÓPEZ MALDONADO

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Gabriel Vázquez Castro.**

Morelia, Michoacán

Febrero, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 11** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **06 de noviembre de 2018**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno (a) **Paulina Aída López Maldonado** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **414003837**, con la tesis titulada: "Estudio paleoclimático del Holoceno en el estado de Jalisco, caso de estudio de San Juanito de Escobedo.", **bajo la dirección como tutor del** Dr. Gabriel Vázquez Castro. El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Avtandil Gogichaishvili
Vocal:	Dr. Priyadarsi Debajyoti
Secretario:	Dr. Gabriel Vázquez Castro
Suplente 1:	Dra. Berenice Solís Castillo
Suplente 2:	M. en C. Diana Cinthia Soria Caballero

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 31 de enero de 2019.


DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ
SECRETARIO GENERAL

“Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía. Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia”

Anónimo

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrigarme en sus aulas dentro de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia y proporcionarme las herramientas y conocimientos necesarios para formarme como geocientífica.

A mi asesor de tesis Gabriel Vázquez Castro, muchas gracias por la oportunidad brindada, por ser una pieza fundamental en este cierre de ciclo, por creer en mí y enseñarme que ningún objetivo es imposible de cumplir sí y solo sí la perseverancia y disciplina se conjuntan. Gracias por las enseñanzas, por ser mi maestro, mi guía y un ejemplo a seguir. Fue un gusto viajar en el tiempo contigo, desde finales del Pleistoceno hasta la actualidad, muchas gracias por la experiencia compartida.

Agradezco el apoyo brindado por el proyecto UNAM – DGAPA – PAPIIT – IA107317 otorgado al Dr. Gabriel Vázquez Castro, con el cual se realizó la investigación. A sí mismo quiero agradecer a los laboratorios de la UNAM y a sus responsables que me abrieron las puertas para realizar distintas pruebas, estos son: Laboratorio de Paleambientes del Instituto de Geología (Dr. Priyadarsy D. Roy) Laboratorio de Agua y Suelo del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (M. en C. Hilda Rivas), Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán (Dr. Avtandil Gogichaisvili) y al Laboratorio de Estudios Paleoclimáticos y Paleoambientales de la ENES, Morelia.

Agradezco al Maestro Neftalí Razo por su apoyo técnico en el laboratorio de química, a Erick Yamanik García Abrego y Saúl Macías por su apoyo en el trabajo de campo, a Guillermo Vera Vera por su apoyo en el Laboratorio de Paleambientes del Instituto de Geología y finalmente, a Catalina Mejía Ánegeles por su apoyo en la determinación de materia orgánica.

A mi mesa sinodal, agradezco las sugerencias, los comentarios, la disponibilidad y el tiempo invertido para nutrir y mejorar este trabajo de investigación.

DEDICATORIAS

- ♥ Dedico esta tesis a Dios, por conservarme con vida para llegar a este momento tan especial e importante, y por darme la energía necesaria para continuar en cada nueva etapa.
- ♥ A mis papás, porque sin la combinación de sus genes yo no estuviera aquí, gracias por sus esfuerzos, motivaciones y eterna paciencia; sin esto no hubiera sido posible culminar mi preparación académica. No hay mejor regalo que los valores que me han heredado, han formado a una buena persona y honesta profesionista.
- ♥ A mis hermanos, que con sus palabras me ayudan a reafirmar mi valentía, la cual traerá grandes frutos en mi vida personal y profesional. Es un gusto compartir el día a día con ustedes, definitivo mi postura ante el mundo no sería la misma sin ti, Benja y sin ti, Moni (gracias por traer a mi vida a un ser tan hermoso llamado Leonardo).
- ♥ A Vane. He conocido a personas increíbles, pero tú eres un ser mágico y aquí, en este trabajo se refleja todo lo que aprendí junto a ti. Segura estoy de que mi andar universitario no hubiera sido el mismo sin tus conocimientos, tu amistad, tu amor y cariño (sin ti). Muchísimas gracias por las aventuras compartidas y por ser (para mí) el significado de talento y pasión... ¡Te quiero tanto!
- ♥ A todos mis amigos, es una bendición haberlos encontrado y soy dichosa de compartir el tiempo con ustedes, gracias por las palabras de aliento, por las charlas de desahogo, por entender mis ausencias, por seguir aquí y festejar conmigo esta meta lograda. Deseo sigan a mi lado por mucho tiempo.
- ♥ A Ramón Adrián Plata Ramírez, porque me compartiste de una forma tan “única” cuan apasionante son las ciencias de la Tierra y sin querer me “impregnaste” de eso, y me maravilló tanto que, mira, ahora estoy por ser un miembro más de esta comunidad. Gracias, querido paleontólogo.

ESTUDIO PALEOCLIMÁTICO DEL HOLOCENO EN EL ESTADO DE JALISCO, CASO DE ESTUDIO DE SAN JUANITO DE ESCOBEDO”

ÍNDICE

	Página
-Jurado de examen.....	II
- Agradecimientos.....	IV
- Dedicatorias.....	V
- Índice de figuras.....	VIII
- Índice de tablas.....	X
- Abreviaturas.....	XI
-Abstract.....	XIII
- Resumen.....	XIV
I. INTRODUCCIÓN	
I.I. Importancia y significado de los estudios paleoclimáticos.....	1
I.I.I. Forzadores climáticos.....	2
I.II. Antecedentes.....	3
I.III. Planteamiento del problema.....	4
I.IV. Objetivos.....	5
II. GENERALIDADES	
II.I. Localización y vías de acceso.....	6
II.II. Fisiografía.....	7
II.III. Clima y vegetación.....	9
II.IV. Hidrografía.....	10
II.V. Características geológicas regionales.....	12
II.VI. Suelos.....	15
III. METODOLOGÍA	
III.I. Obtención de muestras de sedimentos lacustres.....	17
III.I.I. Sub muestreo.....	22
III.II. Propiedades físicas.....	23
III.II.I. Granulometría.....	23
III.II.II. Color.....	24
III.II.III. Contenido de carbonatos.....	24
III.III. Propiedades magnéticas.....	25
III.III.I. Susceptibilidad magnética.....	25
III.IV. Determinación de materia orgánica.....	26
III.V. Propiedades geoquímicas y radiogénicas.....	28
III.V.I. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	28
III.V.II. Fechamientos por isótopos radiogénicos.....	29

III.V.III. Tasa de sedimentación.....	29
IV. RESULTADOS	
IV.I. Propiedades físicas.....	30
IV.I.I. Granulometría.....	30
IV.I.II. Contenido de carbonatos.....	32
IV.II. Propiedades magnéticas.....	33
IV.II.I. Susceptibilidad magnética.....	33
IV.III. Cantidad de materia orgánica.....	35
IV.IV. Características geoquímicas.....	36
IV.IV.I. FRX.....	36
IV.IV.II. Fechamientos radiogénicos y modelo de edades.....	44
IV.V. Columna estratigráfica.....	45
V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
V.I. Correlación de edades (cronocorrelación).....	48
V.II. Modelo de edades y tasas de sedimentación.....	51
V.III. Correlación litoestratigráfica de secuencias dentro del lago.....	53
V.IV. Interpretación geoquímica a lo largo del tiempo.....	55
V.IV.I. Comparación del suelo y sedimentos.....	55
V.IV.II. Indicadores geoquímicos.....	57
V.V. Interpretación paleoambiental y paleoclimática,.....	67
VI. CONCLUSIONES	70
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
II.1. Ubicación zona de estudio.....	6
II.2. Provincias geológicas de la República Mexicana.....	7
II.3. Ubicación regiones hidrológicas RH12 y RH14.....	11
II.4. Mapa geológico de la zona de estudio.....	14
II.5. Mapa de los tipos de suelos en la zona de estudio.....	16
III.1. Fotografías de las trincheras realizadas para muestreo.....	18
IV.1. Tipos de granos presentes en la columna maestra.....	31
IV.2. Concentración de carbonatos en la secuencia maestra.....	32
IV.3. Susceptibilidad magnética de los sedimentos lacustres de LOB.....	34
IV.4. Concentración de materia orgánica en la secuencia maestra.....	35
IV.5. Concentración de elementos mayores en sedimentos lacustres de LOB...	40
IV.6. Concentración de elementos trazas en sedimentos lacustres de LOB.....	43
IV.7. Modelo de edades para la secuencia maestra de LOB.....	44
IV.8. Columna estratigráfica para los sedimentos de LOB.....	45
IV.9. Espículas de esponja en vista microscópica.....	47
IV.10. Diatomea tipo pennal observada en microscopio.....	47
V.1. Ubicación de SJE y LOB dentro de la cuenca Etzatlán-Magdalena.....	48
V.2. Correlación entre los registros LOB y SJE.....	49
V.3. Modelo de edades establecido con cinco fechamientos para LOB.....	51

V.4. Asociaciones de facies entre SJE y LOB.....	54
V.5. Correlación entre elementos químicos afines.....	56
V.6. Relación de Ti, Fe y SM LOB.....	59
V.7. Relación Ti de LOB con SJE.....	60
V.8. Relación de K, A y Si de LOB.....	61
V.9. Relación de K de LOB con SJE.....	62
V.10. Variaciones de Si/Ti en LOB.....	64
V.11. Relación de Ca, Sr y Sr/Ti en LOB.....	66
V.12. Relación de materia orgánica con indicadores geoquímicos en LOB.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
I. Muestras obtenidas en Pozo 1.....	18
II. Muestras obtenidas en Pozo 2.....	19
III. Muestras obtenidas en Pozo 3.....	19
IV. Muestras finales utilizadas para análisis.....	20
V. Evaluación del contenido de carbonato de acuerdo a la efervescencia.....	24
VI. Resultados del análisis radiogénico en sedimentos orgánicos.....	44
VI. Tasas de sedimentación.....	52

ABREVIATURAS

+	Más	ENOS	El Niño Oscilación del Sur
>	Mayor que	et al.	y colaboradores/ y otros
<	Menor que	etc	Etcétera
%	Porcentaje	EUA	Estados Unidos de América
κ	Susceptibilidad magnética en términos de volumen	g	Gramos
°	Grados	H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
°C	Grados centígrados	H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
¹⁴ C	Carbono catorce	HCl	Ácido clorhídrico
ACw	Semicálido-Subhúmedo	HF	High Frequency (alta frecuencia)
Al	Aluminio	Fe	Hierro
AP	Antes del Presente	FeSO ₄	Sulfato ferroso
Ca	Calcio	FRX	Fluorescencia de Rayos X
CaCO ₃	Carbonato de Calcio	FVTM	Faja Volcánica Transmexicana
cm	Centímetro		
cm ³	Centímetro cúbico	hm ³	Hectómetro cúbico
Ctra	Carretera	INAFED	Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo municipal
Cw	Subhúmedo con lluvias en verano		
CO	Carbono Orgánico	INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua	Jal	Jalisco
dm ²	Decímetro cuadrado	K	Potasio
E	Este	K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de potasio
ENES	Escuela Nacional de Estudios Superiores	Km	kilómetros
		LF	Low Frequency (baja frecuencia)

LOB	La Otra Banda	Si	Silicio
m	metro	SI	Sistema Internacional de Unidades
Ma	Millones de años	SJE	San Juanito de Escobedo
ml	Mililitros	SGM	Servicio Geológico Mexicano
mm	Milímetros	SM	Susceptibilidad Magnética
Mn	Manganeso	SMN	Servicio Meteorológico Nacional
Mg	Magnesio	Sr	Estroncio
MO	Materia Orgánica	Ti	Titanio
MNA	Monzón de Norte América	UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
No	Número	Vol	Volumen
NW	Noroeste	W	Oeste
pH	Potencial de Hidrógeno	ZCIT	Zona de Convergencia Inter Tropical
R	Río	Zr	Zirconio
Rb	Rubidio	Zn	Zinc
RH	Región Hidrológica		
SE	Sureste		

ABSTRACT

The research focuses on the western portion of the Trans-Mexican Volcanic Belt, in San Juanito de Escobedo located west of the Tequila volcano. The objective of this work is to carry out a paleoenvironmental and palaeoclimatic study using geochemical, sedimentological and magnetic susceptibility proxies, from the analysis of a 2.17 m sequence with lake sediments from the Etzatlán-Magdalena basin. This sequence covers the last 14,141 years cal BP, based on the age model obtained from five dates ^{14}C .

By means of analysis of physical properties such as granulometry, color and carbonate content, the separation between different stratigraphic units could be established, to allow the construction of a representative stratigraphic column for the studied lake. The magnetic susceptibility analysis allowed us to make a reliable stratigraphic correlation between materials of the present study and materials of previous study realized in the basin in order to compare information and correlate previously performed dates. X-ray fluorescence studies and organic matter determination allowed us to carry out a paleoenvironmental analysis in a general way and to relate them with some climatic events.

Based on the interpretation of all the mentioned analyzes, it is interpreted for the end of the Upper Pleistocene (14,141 - 11,622 BP) and arid climate but not enough for the desiccation of the lake; in the Lower Holocene (11,622 BP - 8,226 BP) the environmental conditions were humid, however they changed drastically for the Middle Holocene (8,226 - 4,276 BP), due to an extensive period of carbonate precipitation that suggests an extremely dry climate, possibly associated to the called "Holocene Climatic Optimum" event. Finally, during the Upper Holocene (4,276 - 2,464 AP), the data show oscillations possibly indicating a cyclical alteration of dry and humid conditions in the basin possibly associated to El Niño Southern Oscillation event.

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en la porción occidental de la Faja Volcánica Transmexicana, en el municipio de San Juanito de Escobedo ubicado al occidente del volcán Tequila. El objetivo de este trabajo es realizar un estudio paleoambiental y paleoclimático mediante el uso de proxies geoquímicos, sedimentológicos y susceptibilidad magnética, a partir del análisis de una secuencia de 2.17 m con sedimentos lacustres de la cuenca Etzatlán-Magdalena. Esta secuencia abarca los últimos 14,141 años cal AP, a partir del modelo de edades obtenido por medio de cinco fechamientos realizados por ^{14}C .

Mediante los análisis de propiedades físicas como la granulometría, el color y el contenido de carbonatos, se pudo establecer la separación entre distintas unidades estratigráficas que permitieron construir una columna estratigráfica representativa para el lago estudiado. Los análisis de susceptibilidad magnética nos permitieron hacer una correlación estratigráfica confiable entre el presente estudio y con materiales cercanos de estudios previos realizados en la cuenca para poder comparar con los materiales información y correlacionar fechamientos realizados previamente. Los estudios de fluorescencia de rayos X y determinación de materia orgánica nos permitieron realizar un análisis paleoambiental de manera general y relacionarlos con algunos eventos climáticos.

Con base en la interpretación de todos los análisis mencionados se obtuvo que para finales del Pleistoceno superior (14,141 – 11,622 AP) en la región el clima fue árido pero no lo suficiente como para secar el lago; en el Holoceno inferior (11,622 AP – 8,226 AP) las condiciones ambientales fueron húmedas, sin embargo cambiaron drásticamente para el Holoceno medio (8,226 – 4,276 AP), debido a un extenso período de precipitación de carbonatos que sugiere un clima extremadamente seco, el cual posiblemente esté asociado al evento llamado “Óptimo Climático del Holoceno”. Finalmente, durante el Holoceno superior (4,276 – 2,464 AP), los datos presentan oscilaciones que posiblemente indican una alteración cíclica de condiciones secas y húmedas en la cuenca posiblemente asociado a El Niño Oscilación del Sur.

I. INTRODUCCIÓN

I.I. Importancia y significado de los estudios paleoclimáticos

La paleoclimatología se encarga de estudiar la dinámica evolutiva en el clima antes del periodo instrumental, para lograrlo se necesitan de archivos naturales como lo son los sedimentos lacustres. Los lagos actúan como fuentes captadoras de materiales alogénicos y autigénicos, que por su naturaleza poseen un registro continuo de eventos volcánicos, tectónicos y climáticos que ocurren a nivel local e inclusive regional (Alcántara *et al.*, 2010).

En el pasado se establecieron ciertos regímenes climáticos que modificaron la temperatura y precipitación. Para conocer esos regímenes y las causas de la modificación del clima (Lozano *et al.*, 2015) se necesita del estudio de los registros naturales, ya que en ellos se almacenan indicadores ambientales mejor conocidos como proxies los cuales pueden ser biológicos, químicos y físicos. Estos proxies pueden ser estudiados mediante distintas técnicas que nos permiten reconocer distintos eventos. Una gran limitación para los registros paleoclimáticos recae en su datación, el método más común es el radiocarbono (^{14}C), sin embargo, presenta algunas desventajas como la imposibilidad de datar eventos anteriores a 50,000 años (Bernal y Roy, 2010).

Durante los tiempos más recientes tanto en los medios de comunicación como en los discursos políticos ha existido una tendencia general a relacionar el cambio climático con las actividades antrópicas. Sin embargo, gracias a los estudios paleoclimáticos podemos entender que la Tierra nunca ha tenido un clima estable, ya que en los últimos 400,000 años el clima se ha caracterizado por tener fluctuaciones muy marcadas en ciclos de ~100,000 años (Caballero *et al.*, 2010), aunque cabe señalar que las actividades humanas han funcionado como catalizadores de distintos procesos.

I.I.I. Forzadores climáticos

El clima es un conjunto de variables atmosféricas y superficiales, tales como: la temperatura, la precipitación, el viento, la humedad, la nubosidad, la humedad del suelo, la temperatura del océano y las concentraciones de hielo. Existen numerosos factores que contribuyen al cambio climático, uno de estos son los forzadores climáticos (NRC, 2001).

Los forzadores climáticos son perturbaciones en el balance de energía entrante y saliente en la Tierra, y estas perturbaciones pueden ser causadas por cambios en la radiación solar, variaciones en las corrientes oceánicas y en la circulación atmosférica (NRC, 2001). Cambios en los sistemas mencionados anteriormente han sido causantes de diversos eventos climáticos cómo, por ejemplo:

- El Último Máximo Glacial (UMG), se caracteriza por un momento en donde los glaciares experimentaron un volumen máximo, se sitúa entre los 22,000 a 18,000 años cal AP (Caballero *et al.*, 2010).
- El Younger Dryas, se distingue por una etapa de enfriamiento extremo, situado entre los 11,000 a 10,000 años cal AP, aunque las causas de este fenómeno climático son aún desconocidas (Berger, 1990).
- El Óptimo Climático del Holoceno, se diferencia por ser un momento en donde las temperaturas medias fueron ligeramente más cálidas, en la escala del tiempo, se sitúa hace 6,000 a 2,500 años cal AP (Monroe *et al.*, 2008).
- Y, actualmente, El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Durante este fenómeno los vientos alisios se debilitan causando la retención de aguas cálidas en la porción oeste del océano Pacífico sur; mientras que en la porción este del océano Pacífico las aguas frías predominan generando altas presiones, inhibiendo la formación de nubes productoras de lluvias (Magaña *et al.*, 1997).

I.II. Antecedentes

El desarrollo de investigaciones en la región de estudio se divide en tres áreas. La primera corresponde a estudios paleoambientales, el estudio más reciente aborda el tema de la paleohidrología en la cuenca Etzatlán – Magdalena, Jal., en donde se plantean un nuevo registro paleoclimático holocénico, así como los posibles forzadores climáticos naturales que modificaron la dinámica climática (Vázquez *et al.*, 2017), en esta misma línea de investigación se encuentra el trabajo realizado en lago de Juanacatlán, Jal., en donde se pudo conocer la variabilidad en la precipitación en los últimos 2,000 años y como esta se relaciona con la intensidad de las lluvias monzónicas (Metcalf *et al.*, 2010).

La segunda línea de investigación corresponde con trabajos relacionados con la geología del volcán Tequila; se encuentra el trabajo realizado de geología regional, en donde se exponen los últimos avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana, la cual llega hasta el territorio de Jalisco, referente a esta porción se concluye que el volcán Tequila forma parte del bloque Jalisco el cual se ubica en el sector occidental y que el volcanismo Terciario de la Sierra Madre Occidental no afecta a la zona que ocupa el bloque Jalisco (Ferrari, 2000). Sobre este mismo volcán, el trabajo más reciente maneja el tema de fenocristales en dacitas y andesitas en lavas de dicho volcán; se propone la desgasificación cómo una posible causa del empobrecimiento de fenocristales (Frey y Lange, 2011). En esta misma temática se tiene la investigación que aborda el tema del tipo de magmas y rocas existentes, en este trabajo se hace la conclusión de que los magmas calcoalcalinos se forman principalmente a través del fraccionamiento de cristales del manto basáltico alcalino junto con la asimilación del material de la corteza (Wallace y Carmichael, 1994).

Finalmente, la tercera área de conocimiento corresponde al estudio regional de sismicidad donde se analizaron los hipocentros y mecanismos focales para examinar el ancho sismogénico de la zona de subducción de Michoacán-Colima-Jalisco, lo que corresponde a la porción noroeste de la placa de Cocos y la placa de Rivera, en este trabajo concluyen que debido a las diferentes profundidades máximas estimadas para la zona de acoplamiento sismogénico de cada placa, el ancho sismogénico es distinto por la diferencia en el ángulo de buzamiento entre las placas (Martínez y Mendoza, 2016).

I.III. Planteamiento del problema

Para las investigaciones recientes del cambio climático los estudios paleoambientales y paleoclimáticos se han vuelto de gran interés, en particular aquellas que usan secuencias sedimentarias lacustres debido a la resolución de las mismas, sin embargo, se han visto perturbadas por agentes exógenos, endógenos y recientemente por actividades antrópicas. En México existe una falta de registros completos debido a la existencia de hiatos en muchas de las secuencias lacustres, lo cual causa un desconocimiento de los cambios ambientales y climáticos ocurridos en la transición Pleistoceno – Holoceno.

La presente investigación esta motivada por la escasez de información de tipo geológico, paleoclimático y paleambiental en el occidente de México, así como por la necesidad de conocer en nuestro país la repercusión de eventos climáticos mundiales como el Último Máximo Glacial, el Younger Dryas, el Óptimo Climático del Holoceno, así como conocer los efectos que han ocasionado en el clima actual los fenómenos climáticos como el fenómeno del Niño y los ciclones tropicales.

I.IV. Objetivos

El objetivo general es realizar un estudio paleoclimático mediante el uso de proxies geoquímicos y sedimentológicos, a partir del análisis de sedimentos lacustres, que nos permita conocer los cambios climáticos y ambientales ocurridos a nivel local en la transición Pleistoceno- Holoceno y finalmente, reconstruir las condiciones y los posibles forzadores climáticos que han actuado a lo largo del Holoceno.

Los objetivos particulares son:

1. Realizar una interpretación estratigráfica con base en procesos sedimentarios definidos a partir del estudio de las características observadas en la columna sedimentaria; para conocer la evolución ambiental de los materiales.
2. Realizar una caracterización geoquímica de la secuencia mediante el uso de FRX para interpretar procesos erosivos y de escorrentía en la cuenca sedimentaria, así mismo conocer las diferencias multi elementales entre la porción edáfica y la sedimentaria.
3. Interpretar condiciones de energía por medio de análisis granulométricos.
4. Realizar un estudio de susceptibilidad magnética para correlacionarse con la información geoquímica de la secuencia y obtener una interpretación paleoclimática con mayor resolución.
5. Determinar el contenido de materia orgánica para analizar las variaciones de abundancia de la biota en la cuenca de drenaje.
6. Establecer la escala de tiempo de la secuencia sedimentaria a partir de fechamientos radiogénicos por ^{14}C para realizar una interpretación temporal durante el Holoceno.
7. Comparar la información con el análisis previo realizado en la misma cuenca de estudio para identificar posibles patrones climáticos que influenciaron dicho comportamiento.

II. GENERALIDADES

II.I. Localización y vías de acceso

El área de estudio se localiza en el municipio de San Juanito de Escobedo, al noroccidente del estado de Jalisco, colinda al norte con el municipio de Magdalena, y al sur con el municipio de Etzatlán. Se encuentra al occidente del cráter del volcán Tequila a una distancia aproximada de 14 km. El acceso a la zona de estudio es por medio de la carretera federal No.15 que comunica de Morelia, Michoacán con el estado de Nayarit, posteriormente se toma la carretera federal No. 70 que corre desde El Arenal hasta Mascota y finalmente la carretera libre Jal. 4 (Figura II.1)

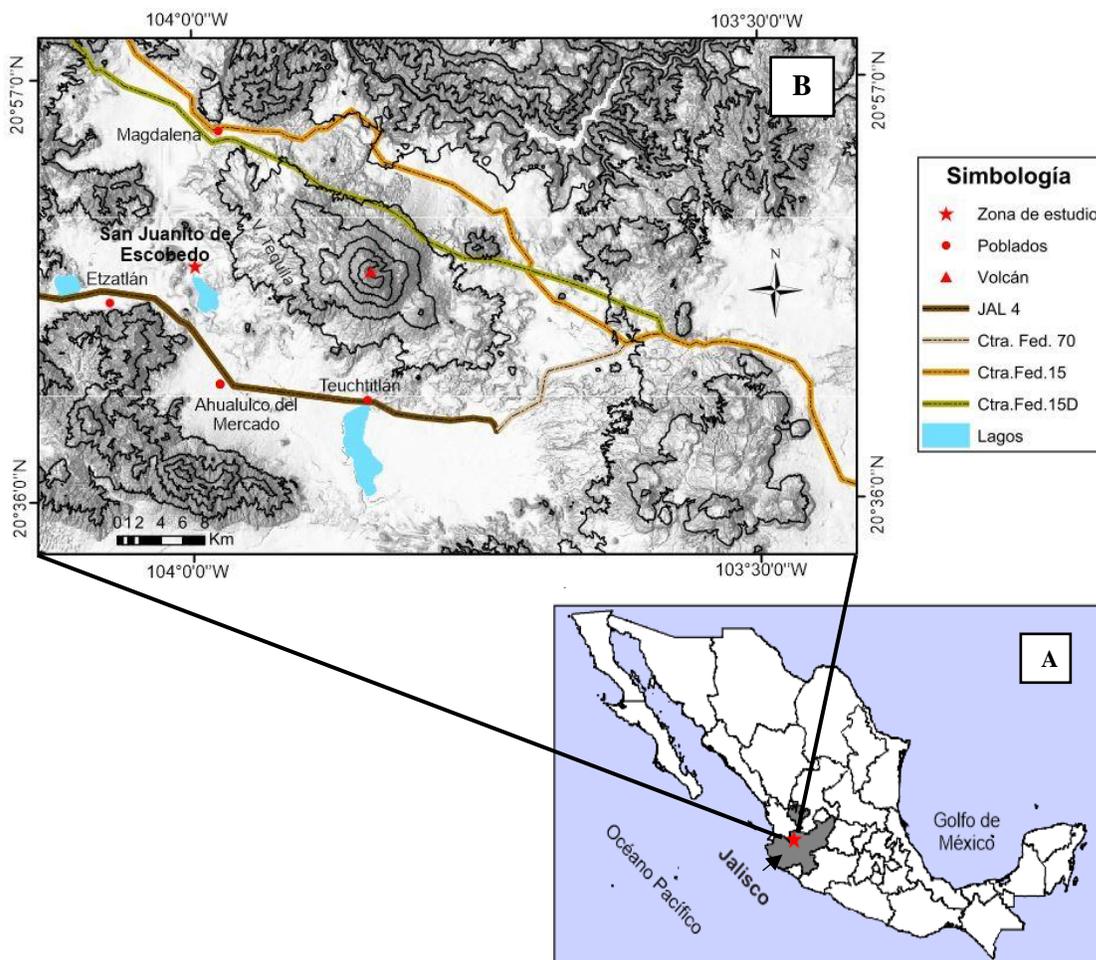


Figura II.1. A) Ubicación general de la zona de estudio en la región centro-occidental de la República Mexicana. Se muestra el estado de Jalisco y dentro del cuadrado se resalta el municipio de San Juanito de Escobedo. B) Acercamiento del área de estudio se muestran las vías principales de acceso así como los poblados y puntos de referencia al sitio de estudio.

II.II. Provincia geológica y fisiográfica

La región estudiada se ubica en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Lugo y Córdova, 1992) y Geológica Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) la cual constituye uno de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circum-Pacífica (Ferrari, 2000). Está constituida aproximadamente por 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos (Gómez *et al.*, 2005), se distribuye con dirección preferencial E-W en su porción centro-oriental y WNW-ESE en su parte occidental. La FVTM forma un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana y tiene aproximadamente 1,000 km de longitud en sentido E-W (Gómez *et al.*, 2005) (Figura II.2).

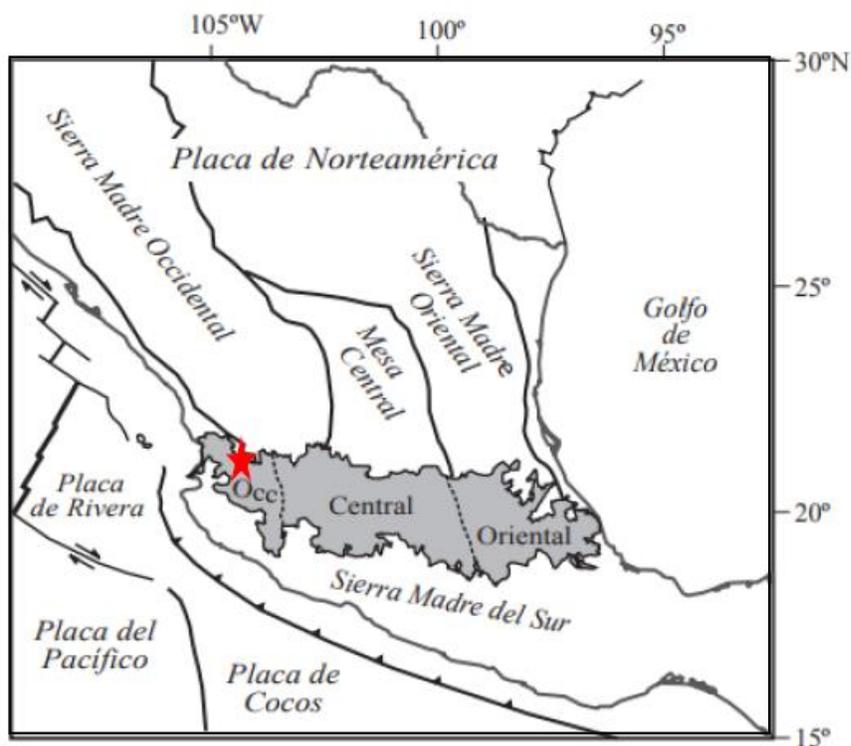


Figura II.2. Provincias geológicas de la República Mexicana (tomada de Gómez *et al.*, 2005). Se representa la ubicación del área de estudio (San Juanito de Escobedo, Jalisco) en la porción occidental de la FVTM la cual es rica en rocas calco-alcalinas del Plioceno-Cuaternario (Ruíz, 2003).

Entre sus rasgos peculiares destacan: a) la gran variabilidad del estilo volcánico y composición química a lo largo de la faja; b) la presencia de volcanismo alcalino de tipo intraplaca espacialmente asociado a la subducción de la placa de Cocos (Ferrari, 2000). La FVTM está constituida por un gran número de conos cineríticos, maares, domos y estratovolcanes con edades que abarcan desde el Neógeno al Cuaternario, con una variedad petrológica de basaltos a dacitas que se relacionan con series magmáticas calcialcalinas enriquecidas en Mg (Schaaf *et al.*, 2005), así como algunos volcanes y derrames alcalinos en la porción oriental (Siebe *et al.*, 1995).

Fisiográficamente la FVTM cuenta con planicies escalonadas ocupadas por montañas volcánicas, campos volcánicos y estratovolcanes cuaternarios; así como por cuencas endorreicas (Lugo y Córdova, 1992). Se caracteriza por contar con derrames basálticos y lagos cuya morfología, orientación y distribución sugieren la idea de estar situados en fosas tectónicas. Los valles, que originalmente habían sido cuencas lacustres profundas, se han llenado con material fluvial y lacustre derivado de las montañas, y con grandes masas de cenizas de los volcanes más recientes (Álvarez, 1961).

Particularmente, en la zona de estudio se encuentran topoformas como llanuras aluviales, lomeríos de basalto con cañadas y una sierra volcánica de laderas escarpadas (INEGI, 2009).

II.III. Clima y vegetación

El estado de Jalisco puede considerarse como una entidad heterogénea desde el punto de vista climático, ya que predomina el clima semicálido-subhúmedo (ACw) en la zona costera, el clima semiseco (BS) distribuido en diferentes sitios y el clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw) en la zona centro (área del presente estudio) de acuerdo a la clasificación de Köppen modificado por García (1973). La temperatura media anual es de 18° a 22°C (INEGI, 2009), cuenta con una precipitación media mensual de 235 mm (SMN, 2017), mientras que la precipitación media anual oscila entre los 800 – 1,000 mm (INEGI, 2009). La evaporación media anual es del orden de 2,170 mm, con una variación anual que va de 1,461 mm a los 2,514 mm; el mes con mayor índice de evaporación media es mayo, el de menor evaporación corresponde a diciembre (CONAGUA, 2015), mientras que la evapotranspiración es de 700 mm por mes.

La vegetación de la región es muy variable, en San Juanito de Escobedo se compone básicamente de pino (*Pinus*), roble (*Quercus*), palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*), higueras (*Ficus carica*) y pochote (*Ceiba pentandra*). Hacia el occidente de la zona de estudio aparecen los nogales (*Juglans regia*), así como especies frutales tales como ciruela (*Prunus domestica*), duraznos (*Prunus pérsica*), guayabas (*Psidium guajava*) y mangos (*Mangifera indica*). Al norte del sitio de interés los montes y cerros se encuentran revestidos de bosques naturales en donde se aprecian pinos (*Pinus*), encinos (*Quercus robur*) y manchones de pirul (*Schinus molle*). Al sur algunas clases de bosques se encuentran cubiertos de pastizales, donde también se pueden encontrar nopales (*Opuntia*) y huizache (*Vachellia*). Al este la vegetación está representada por el oyamel (*Abies religiosa*) y el guamúchil (*Pithecellobium dulce*) (INAFED, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d, 2017e).

II.IV. Hidrografía

En México se han identificado 1,471 cuencas hidrográficas, las cuales se han agrupado en 37 regiones hidrológicas. La zona de estudio se localiza dentro de dos regiones, la principal denominada Lerma-Santiago (RH12) y la secundaria Río Ameca (RH14) (INEGI, 2009).

La región hidrológica Lerma-Santiago (RH12) es una de las regiones más importantes del país, esto se debe a su longitud y caudal. Se origina en el estado de México, continua con una dirección general SE-NW, desemboca en el lago de Chapala donde cambia de nombre a Grande de Santiago y sigue su curso a través de los estados de Jalisco y Nayarit, hasta desembocar en el océano Pacífico. Recibe el aporte de numerosos afluentes: Bolaños, De Joraviejo, La Palmilla, Santa Fe, Guásimas y Huaynamota (INEGI, 2000). Tiene un escurrimiento natural medio superficial interno de 13,180 hm³/año y contiene 58 cuencas hidrológicas (CONAGUA, 2015).

Las cuencas cercanas al sitio de interés dentro de la RH12 son cuenca Río Santiago-Aguamilpa y Río Santiago-Guadalajara (INEGI, 2009). La mayor parte de San Juanito de Escobedo (SJE), se encuentra dentro de la cuenca Río Santiago-Aguamilpa; el área de la cuenca es drenada por una serie de corrientes intermitentes y perennes, sobresale la del río Grande de Santiago, que, a la vez, sirve como límite político-administrativo entre los estados de Jalisco y Nayarit. Los principales cuerpos de agua son las presas: Palo Verde, El Trigo, Labor de Guadalupe y Coatepec. El agua se destina preferentemente para los usos agrícola y en menor escala doméstico y pecuario (INEGI, 2000) (Figura II.3).

En la región hidrológica Ameca (RH14), la corriente principal (río Ameca) actúa como límite entre Nayarit y la parte norte de Jalisco; tiene su origen al oeste de la ciudad de Guadalajara y su recorrido total es de 240 km hasta su desembocadura en la bahía de Banderas, en el océano Pacífico. Sus principales afluentes son los ríos: Tetiteco, Mascota, Sebastián, Los Reyes, Jolapa, Atenguillo y Salado (INEGI, 2000). Tiene un escurrimiento natural medio superficial interno de 1, 279 hm³/año y contiene seis cuencas hidrológicas (CONAGUA, 2015), el drenaje se define como paralelo a subparalelo y dendrítico, conformado por corrientes intermitentes y perenes.

A nivel de cuenca SJE se encuentra dentro de la Presa La Vega-Cocula, la cual es contenida por la RH14 y drenada por dos corrientes perenes: Salado y Cocula, siendo Salado la más importante, con su origen al oeste de la ciudad de Guadalajara.

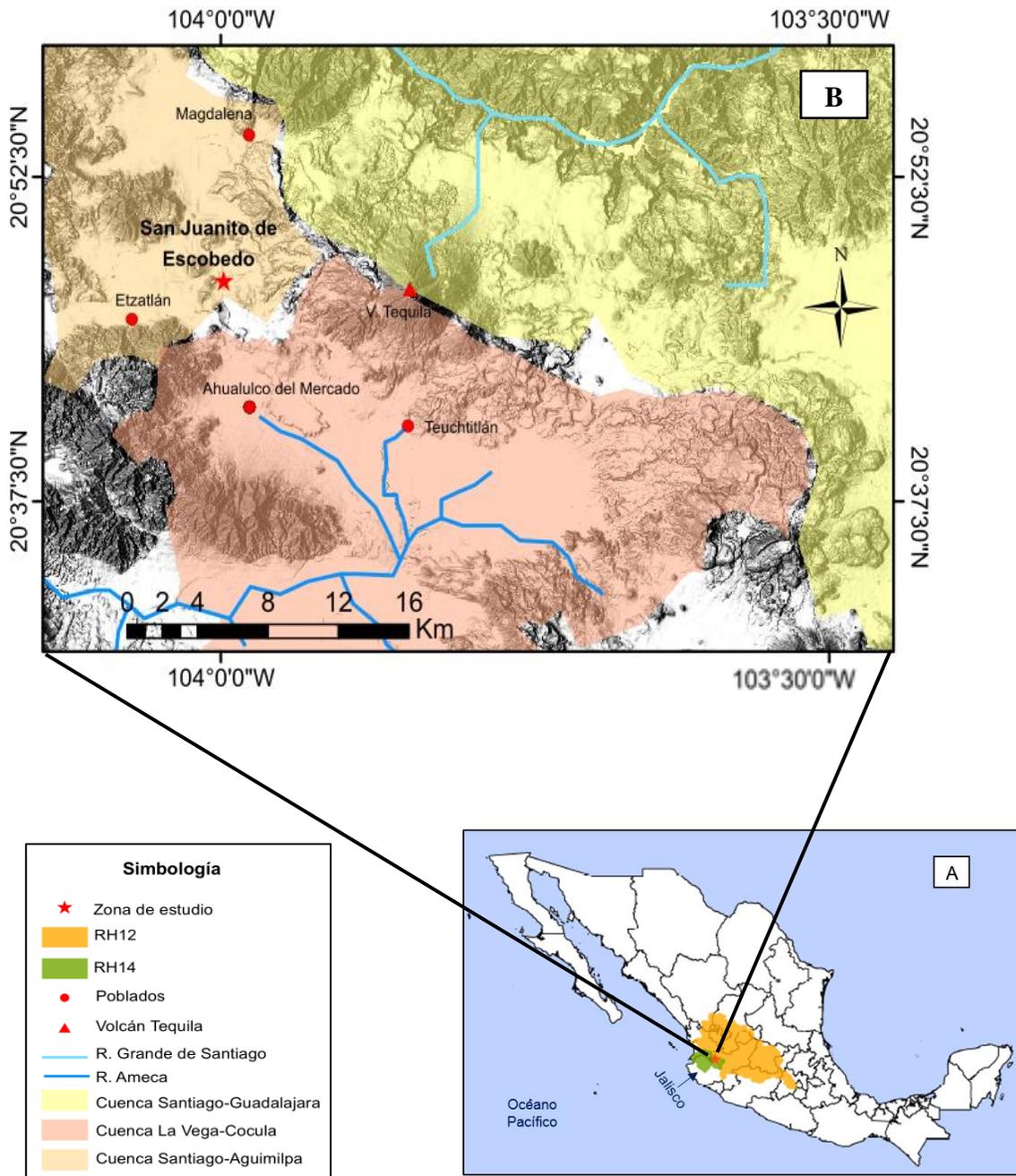


Figura II.3. **A)** Se muestran las regiones hidrológicas RH12 y RH14, las cuales en conjunto abarcan los estados de Nayarit, Jalisco, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato, Michoacán, Querétaro y Estado de México. **B)** Se muestra a nivel regional las principales subcuencas y los principales ríos captadores de agua.

II.V. Características geológicas regionales

Las unidades litoestratigráficas que afloran en el área (Figura II.4) varían en edades desde el Cretácico Inferior hasta el Cuaternario y se componen de tobas riolíticas, andesitas y basaltos. En particular los flujos de lava presentes en la zona varían de composición entre riolítico y andesítico y están asociados a las actividades volcánicas del Tequila entre 0.9 Ma y 0.2 Ma (Wallace y Carmichael, 1994).

Unidad I: Cretácico Inferior (andesita-toba andesítica, KapA-TA)

Unidad estratigráfica aflorante más antigua, consiste de un paquete de coladas de lavas, aglomerados y brechas andesíticas con metamorfismo incipiente, correlacionable con la parte superior de la secuencia vulcanosedimentaria del Terreno Guerrero (SGM, 2001).

Unidad II: Neógeno, Mioceno – Plioceno (basaltos, NplB)

Es una secuencia de afinidad calcoalcalina y alcalina conformada por basalto andesítico, andesita y pórfido andesítico relacionada con la Faja Volcanica Transmexicana. Estas cubren en forma discordante a las rocas cretácicas (SGM, 2001).

Unidad III: Neógeno, Mioceno - Plioceno (volcánico, NmplTR)

La secuencia consiste en flujos de lava de composición máfica a félsicas, ignimbritas félsicas y depósitos volcanoclásticos (Wallace y Carmichael, 1994).

Unidad IV: Neógeno-Cuaternario, Pleistoceno (andesita-basalto, NplQptA-B)

Secuencia conformada por rocas andesíticas y basálticas, las cuales contienen entre un 8-25% en volumen de cristales (fenocristales + microfenocristales), principalmente son ricas en plagioclasas con cantidades menores de ortopiroxenos, augitas, titanomagnetitas e ilmenita (Wallace and Carmichael, 1994).

Unidad V: Cuaternario, Pleistoceno (basalto, QptB)

Vulcanismo basáltico que cubre indistintamente en puntos específicos a las unidades anteriores de forma discordante (SGM, 2001).

Unidad VI: Cuaternario, Pleistoceno (dacitas, QptDa)

Secuencia de dacitas de horblenda las cuales fueron expulsadas por fracturas en el flanco occidental del volcán Tequila, estos flujos son posteriores al edificio principal de dicho volcán (Wallace y Carmichael, 1994).

Unidad VII: Cuaternario, Pleistoceno (riolitas, QptR)

Esta secuencia se compone de depósitos de riolita y obsidiana, de acuerdo a su composición química forman un conjunto heterogéneo de rocas que consisten de riodacitas, riolitas peraluminosas, metaluminosas y peralcalinas. Esta secuencia representa la mayor parte de las rocas de la región (Wallace y Carmichael, 1994).

Unidad VIII: Cuaternario, Holoceno (aluvión, Qhoal)

Durante el Holoceno se depositaron limos y arcillas, así como un conglomerado polimíctico mal clasificado, producto de la acumulación de sedimentos al pie de las formas serranas (SGM, 2012).

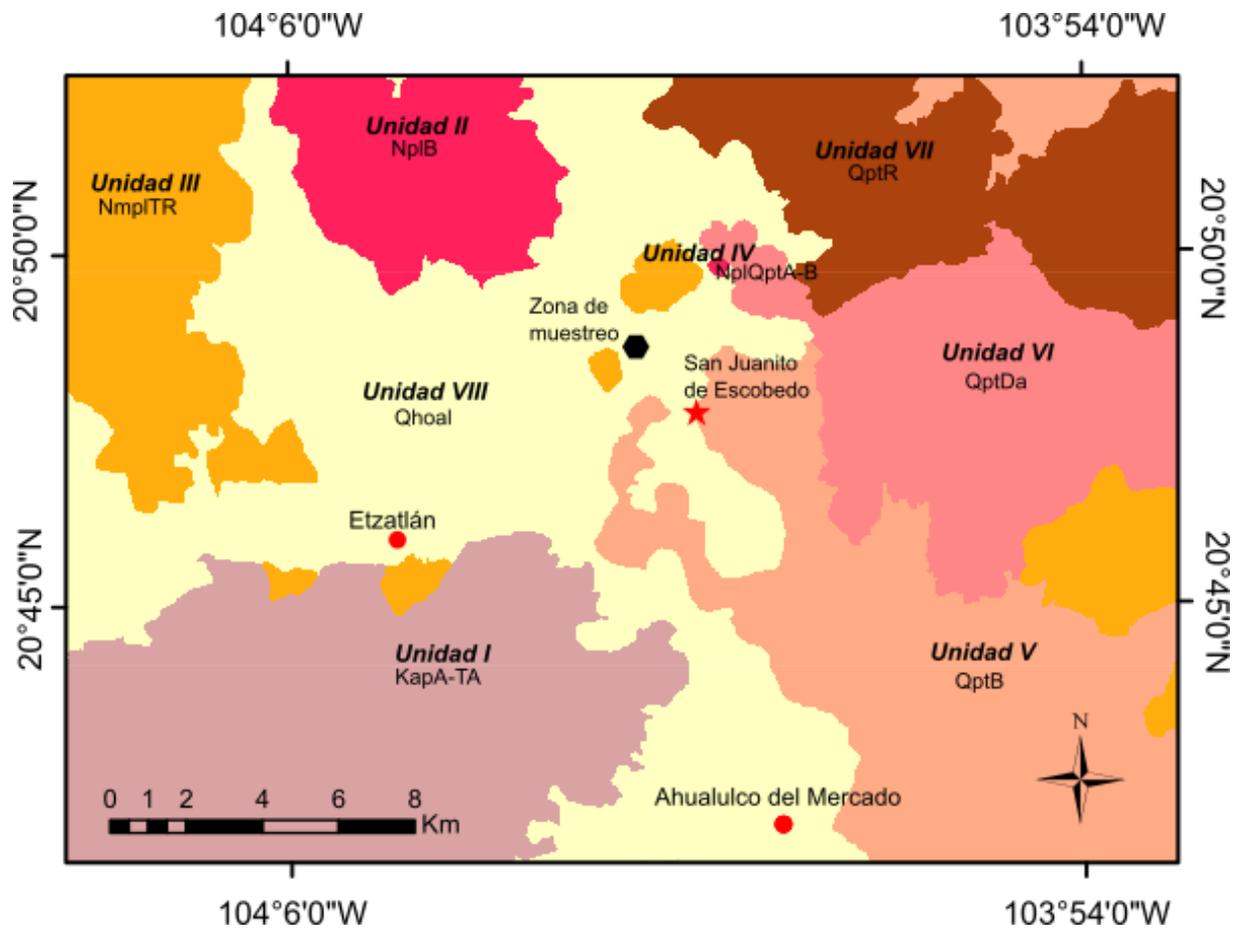


Figura II.4. Mapa geológico de la zona (tomado de Espino Barajas, 2016), en él se muestra la zona de muestreo representado con un hexágono.

II.VI. Suelos

La región se caracteriza por la presencia de una delgada capa de suelos, dentro de los cuales podemos observar los siguientes tipos:

- I. Feozems: suelos típicos de regiones cálidas y húmedas; se desarrollan en materiales no consolidados principalmente en loess y sedimentos lacustres o tills. Son suelos oscuros y ricos en materia orgánica, por lo que son muy utilizados en agricultura de temporal (IUSS, 2007). Representan a la mayor parte de la región de estudio, de acuerdo a lo observado en la figura II.5.
- II. Leptosoles: se encuentran en todas las zonas climáticas (muchos de ellos en regiones secas, cálidas o frías); son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados, que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. El potencial agrícola de este tipo de suelo está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad, lo que los hace difíciles de trabajar (IUSS, 2007).
- III. Luvisoles: suelos típicos de ambientes templados y cálidos; se desarrollan sobre una gran variedad de materiales no consolidados. Se encuentran dentro de los suelos más fértiles por lo que su uso agrícola es muy elevado y cubre, por lo general, la producción de granos pequeños, forrajes y caña de azúcar (IUSS, 2007).
- IV. Regosoles: suelos típicos de regiones áridas y semiáridas, poseen un desarrollo débil en materiales no consolidados. Son suelos pobres en materia orgánica por lo que tienen un mínimo significado agrícola (IUSS, 2007).

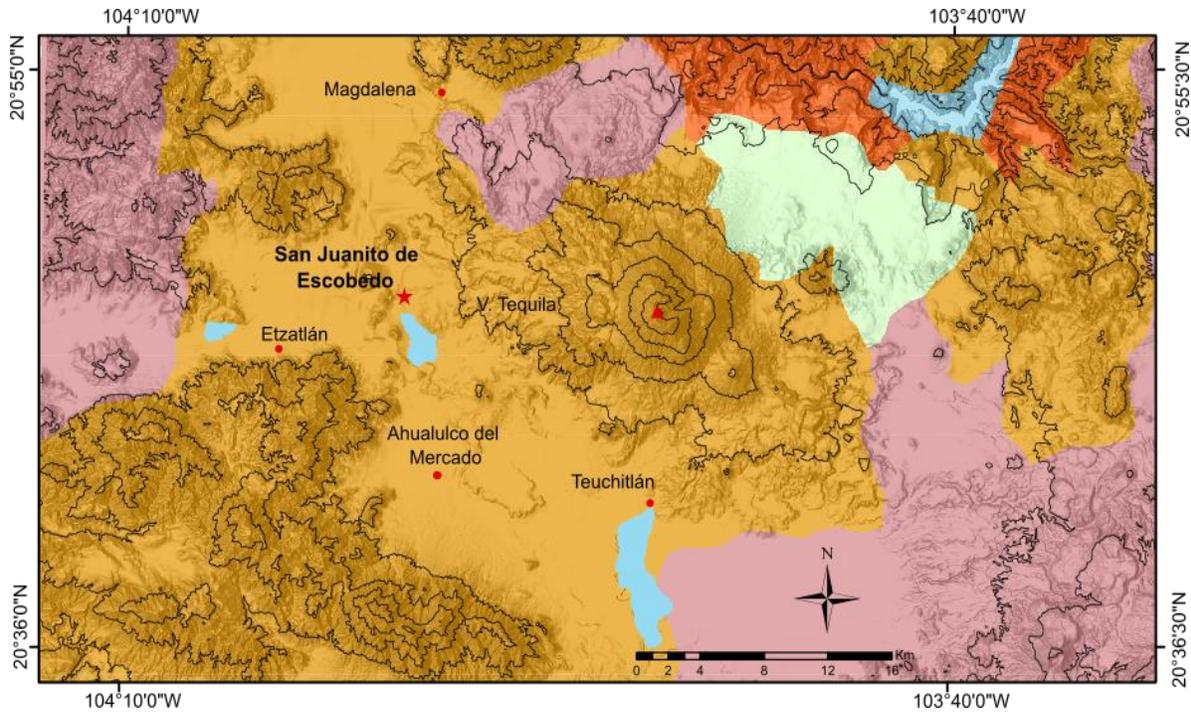


Figura II.5. Se muestran los tipos de suelos presentes en la zona de estudio.

III. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan las técnicas implementadas para el análisis de los sedimentos lacustres, este se divide en cinco secciones: la primera muestra la técnica usada para la obtención de los materiales tanto en campo como el submuestreo en el laboratorio; la segunda sección describe los procedimientos empleados para el análisis de las propiedades físicas de los sedimentos; la tercera sección describe el procedimiento para la obtención de la susceptibilidad magnética, la cuarta sección nos muestra la determinación de la materia orgánica y finalmente, en la quinta sección se habla de las propiedades geoquímicas.

III.I. Obtención de muestras de sedimentos lacustres

El muestreo se realizó en el sitio denominado La Otra Banda (LOB, ubicado en las coordenadas $20^{\circ} 48' 40.4''$ N y $103^{\circ} 00' 46.0''$ W). Se obtuvieron un total de 61 muestras, las cuales fueron colectadas por la técnica de trinchera en un pozo de agua destinado al uso agrícola previamente limpiado, eliminando 10 cm de material superficial para evitar tomar materiales que hubieran sido adheridos a la pared posteriormente a la excavación original. Dentro del pozo se realizaron tres trincheras escalonadas a diferentes profundidades en intervalos regulares de aproximadamente 4 cm, aunque no en todos los casos fue posible por la posición de la trinchera y problemas de derrumbes en la pared.

De esta manera se obtuvieron tres trincheras (Figura III.1). La base de la columna la conforman las muestras del pozo 1, la parte media corresponde a las muestras del pozo 2 y finalmente la cima de las muestras pertenecientes al pozo 3, logrando obtener una columna de 217 cm de profundidad.

- Pozo 1: tiene una longitud de 66 cm y se encuentra en la base de la columna. Se obtuvieron 16 muestras de esta trinchera. (Tabla I).
- Pozo 2: tiene una longitud de 28 cm y se encuentra en la parte media de la secuencia. Se obtuvieron siete muestras en esta trinchera (Tabla II).
- Pozo 3: tiene una longitud de 150 cm, se encuentra en la parte superior y en contacto con el suelo reciente. Se obtuvieron 38 muestras, estas forman la cima de la secuencia (Tabla III).

Se realizó una correlación entre pozos para seleccionar una secuencia maestra representativa de todo el sitio por medio del uso de descripciones de campo, y corroborando

por medio del método de correlación por patrones y capas guía, utilizando la susceptibilidad magnética como registro geofísico (método descrito más adelante); en esta se seleccionaron 54 muestras con las que se hicieron las interpretaciones de este trabajo.

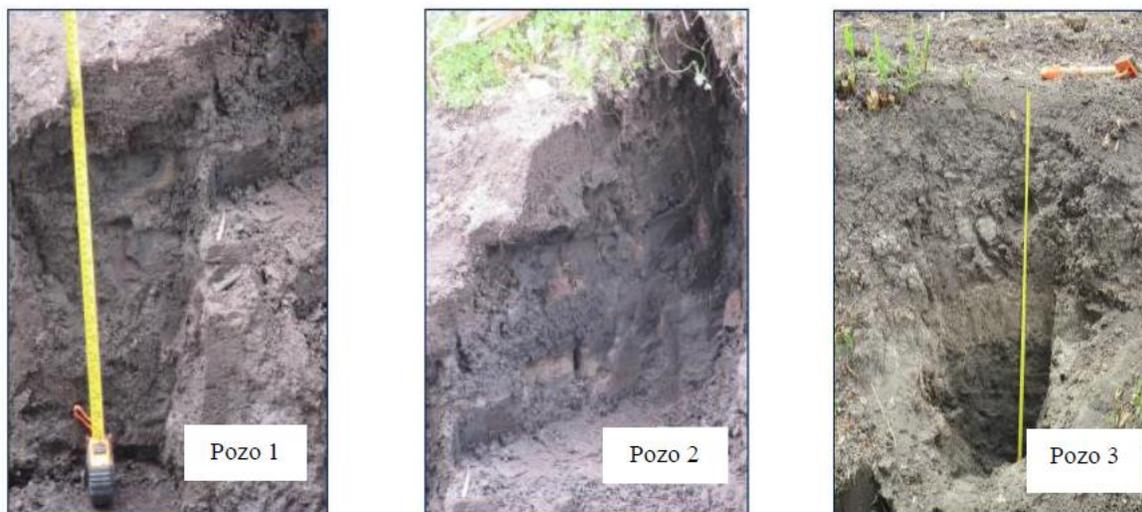


Figura III.1. Se muestran las tres trincheras realizadas para el muestreo, pueden observarse distintas coloraciones en los sedimentos y la profundidad de cada trinchera (66 cm, 28 cm y 150 cm).

Tabla I. Muestras obtenidas en Pozo 1

Clave de la muestra	Profundidad media del intervalo (cm)
LOB-I-(0-5)	157
LOB-I-(5- 9)	161
LOB-I-(9 - 13)	165
LOB-I-(13 - 17)	169
LOB-I-(17 - 21)	173
LOB-I-(21 - 25)	177
LOB-I-(25 - 29)	181
LOB-I-(29 - 33)	185
LOB-I-(33 - 37)	189
LOB-I-(37 - 41)	193
LOB-I-(41 - 45)	197
LOB-I-(45 - 50)	201
LOB-I-(50 - 54)	205
LOB-I-(54-58)	209
LOB-I-(58 - 64)	213
LOB-I-(64 - 68)	217

Tabla II. Muestras obtenidas en Pozo 2

Clave de la muestra	Profundidad media del intervalo (cm)
LOB-II- (0- 6)	128
LOB-II- (6 -10)	132
LOB-II- (10 - 14)	136
LOB-II- (14 -18)	140
LOB-II- (18 - 22)	144
LOB-II- (22 - 26)	148
LOB-II- (26 - 30)	152

Tabla III. Muestras obtenidas en Pozo 3

Clave de la muestra	Profundidad media del intervalo (cm)
LOB-III-(0-4)	2
LOB-III- (4- 8)	6
LOB-III-(8 - 12)	10
LOB-III- (12 - 16)	14
LOB-III-(16 - 20)	18
LOB-III- (20 -24)	22
LOB-III-(24 - 28)	26
LOB-III- (28 - 32)	30
LOB-III-(32 - 36)	34
LOB-III- (36 - 40)	38
LOB-III-(40 - 44)	42
LOB-III- (44 - 48)	46
LOB-III-(48 - 52)	50
LOB-III- (52- 56)	54
LOB-III-(56- 60)	58
LOB-III- (60- 64)	62
LOB-III-(4 - 68)	66
LOB-III- (68- 72)	70
LOB-III-(72- 76)	74
LOB-III- (76- 80)	78
LOB-III-(80 - 84)	82
LOB-III- (84- 88)	86
LOB-III-(88 - 92)	90

LOB-III- (92 - 96)	94
LOB-III-(96 - 100)	98
LOB-III- (100 -104)	102
LOB-III- (104- 108)	106
LOB-III-(108 - 112)	110
LOB-III- (112 -1 16)	114
LOB-III-(116 - 120)	118
LOB-III- (120 -124)	122
LOB-III-(124 - 128)	126
LOB-III- (128 - 132)	130
LOB-III-(132 - 136)	134
LOB-III- (136 - 140)	138
LOB-III-(140 - 144)	142
LOB-III- (144 - 148)	146
LOB-III-(148 - 152)	150

De acuerdo a la correlación se observó un traslape entre las ultimas muestras del pozo 3 con las primeras del pozo 2, de modo que se utilizó solo un grupo de ellas para los distintos análisis (Tabla IV).

Tabla IV. Muestras finales utilizadas para análisis

Clave de la muestra	Profundidad media del Intervalo (m)	Número de pozo
LOB-I-(0-5)	157	1
LOB-I-(5- 9)	161	
LOB-I-(9 - 13)	165	
LOB-I-(13 - 17)	169	
LOB-I-(17 - 21)	173	
LOB-I-(21 - 25)	177	
LOB-I-(25 - 29)	181	
LOB-I-(29 - 33)	185	
LOB-I-(33 - 37)	189	
LOB-I-(37 - 41)	193	
LOB-I-(41 - 45)	197	
LOB-I-(45 - 50)	201	
LOB-I-(50 - 54)	205	
LOB-I-(54-58)	209	
LOB-I-(58 - 64)	213	
LOB-I-(64 - 68)	217	

LOB-II- (0- 6)	128	2
LOB-II- (6 -10)	132	
LOB-II- (10 - 14)	136	
LOB-II- (14 -18)	140	
LOB-II- (18 - 22)	144	
LOB-II- (22 - 26)	148	
LOB-II- (26 - 30)	152	
LOB-III-(0-4)	2	3
LOB-III- (4- 8)	6	
LOB-III-(8 - 12)	10	
LOB-III- (12 - 16)	14	
LOB-III-(16 - 20)	18	
LOB-III- (20 -24)	22	
LOB-III-(24 - 28)	26	
LOB-III- (28 - 32)	30	
LOB-III-(32 - 36)	34	
LOB-III- (36 - 40)	38	
LOB-III-(40 - 44)	42	
LOB-III- (44 - 48)	46	
LOB-III-(48 - 52)	50	
LOB-III- (52- 56)	54	
LOB-III-(56- 60)	58	
LOB-III- (60- 64)	62	
LOB-III-(4 - 68)	66	
LOB-III- (68- 72)	70	
LOB-III-(72- 76)	74	
LOB-III- (76- 80)	78	
LOB-III-(80 - 84)	82	
LOB-III- (84- 88)	86	
LOB-III-(88 - 92)	90	
LOB-III- (92 - 96)	94	
LOB-III-(96 - 100)	98	
LOB-III- (100 -104)	102	
LOB-III- (104- 108)	106	
LOB-III-(108 - 112)	110	
LOB-III- (112 -1 16)	114	
LOB-III-(116 - 120)	118	
LOB-III- (120 -124)	122	
LOB-III-(124 - 128)	126	

Posteriormente al muestreo en campo, los materiales fueron llevados al laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Morelia, en donde fueron almacenados en un refrigerador a 4 °C, con la finalidad de conservar las condiciones de humedad y temperatura del sitio de muestreo.

III.I.I. Submuestreo

Para los análisis de laboratorio se realizaron varios tipos de submuestreo, entre éstos se considera la extracción independiente de materiales para determinación de granulometría, contenido de carbonatos, observaciones al microscopio, determinación de materia orgánica, fluorescencia de rayos X, susceptibilidad magnética y fechamientos radiogénicos.

Las muestras fueron conservadas húmedas a una temperatura de 4°C; los estudios de propiedades físicas se realizaron en todas las muestras, respecto a los análisis de magnetismo el intervalo de muestreo se realizó también en las 54 muestras, para este proceso se utilizaron cubos de acrílico de 8 cm³ los cuales fueron completamente rellenos, ya que la medición de la propiedad depende del volumen total de la muestra.

Al estar examinando las muestras se detectó la presencia de agregados los cuales son indicadores de procesos pedogenéticos; estos se encuentran a lo largo de los primeros 50 cm de la columna.

Las muestras utilizadas para los estudios de propiedades geoquímicas fueron tomadas cada 8 cm aproximadamente y secadas en horno a 50°C por dos semanas. Estas mismas muestras se utilizaron para determinar la cantidad de materia orgánica. Respecto al análisis radiogénico se determinó tomar 30 g de muestra a los 213 cm y 102 cm de profundidad, teniendo los cuidados necesarios para evitar contaminar los materiales.

III.II. Propiedades físicas

Se analizaron 54 muestras, en el laboratorio de estudios Pleoclimáticos y Paleambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia.

III.II.I. Granulometría

El análisis del tamaño de grano (mejor conocida como granulometría) es una técnica analítica; consiste en determinar el tamaño de las diferentes partículas que constituyen un depósito sedimentario (Folk, 1980). Conocer la granulometría que conforma los sedimentos, es útil para interpretar los mecanismos y ambientes de depósito (Tucker, 2003).

Dicha propiedad puede inferirse a través de la “prueba al tacto” propuesta en el “Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo” (Siebe, 2006). Para realizar la prueba se humedece una pequeña muestra (aproximadamente 2 g). No debe presentar exceso de humedad al momento de presionarla. Posteriormente se observan las características de moldeado, consistencia y granulometría de la muestra, presionándola y palpándola entre los dedos, moldeándola formando esferas y rollos (Siebe, 2006).

En general las tres fracciones principales (arena, limo y arcilla) presentan las siguientes características en la prueba al tacto.

1. Arena: no es moldeable, no deja material fino en las palmas de las manos, los granos son claramente palpables.
2. Limo: poco moldeable, se siente harinoso, la superficie al palparlo entre los dedos índice y pulgar es áspera, se agrieta al presionarlo.
3. Arcilla: es moldeable, deja material fino en las palmas de las manos, la superficie al palparlo entre los dedos índice y pulgar es lisa y brillante.

III.II.III. Color

Los colores en los sedimentos reflejan aspectos importantes como: los entornos de deposición, condiciones redox y las tasas de deposición de materia orgánica. Los colores generalmente son controlados por minerales accesorios y compuestos de hierro y carbono orgánico (Myrow, 1978).

Su determinación se realiza por medio de tablas de color (Munsell, 2009). Para ello la muestra deberá ser humedecida, para permitir la comparación de una muestra con otra (Siebe, 2006).

III.II.III. Contenido de carbonatos

El contenido de carbonatos se estima observando la efervescencia de la muestra al adicionar ácido clorhídrico (HCl). Se le agregan unas gotas de HCl diluido al 10% al material humedecido (para no confundir la emisión de burbujas de aire con una efervescencia), y se estima el contenido de carbonatos evaluando la efervescencia de acuerdo con la Tabla V (Siebe, 2006).

Tabla V. Evaluación del contenido de carbonato de acuerdo a la efervescencia

Efervescencia	Evaluación	CaCO₃ (%)
Reacción invisible e inaudible	Libre de carbonatos (k0)	0
Reacción audible, pero invisible	Muy bajo (k1)	0-0.5
Reacción ligera, apenas visible	Bajo (k2)	0.5-2
Efervescencia fuerte, pero breve	Medio (k3)	2-10
Efervescencia fuerte y prolongada	Alto (k4) Muy alto (k5) Extremadamente alto (k6)	10-25 25-50 >50

III.III. Propiedades magnéticas

III.III.I. Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética (SM) es la magnetizabilidad de una sustancia (Butler, 1998) respecto a un campo magnético externo. La SM de la mayoría de las rocas es proporcional a la cantidad y tipo de minerales ferromagnéticos presentes, principalmente magnetita (Lindsley *et al.*, 1966) y es controlada por su tamaño de grano, su composición química, temperatura y presión.

Todos los materiales tienen SM, la cual puede ser positiva o negativa y de acuerdo con su comportamiento frente a un campo magnético, los materiales se dividen en (Soler, 2006):

1. Diamagnéticos: este fenómeno consiste en la aplicación de un magnetismo inducido en la dirección opuesta al campo aplicado (Mizutani, 2001), los materiales que poseen esta propiedad tienen valores negativos muy pequeños de SM (Tipler y Mosca, 2003) y generalmente pueden considerarse como no magnéticos para fines geofísicos (Clark, 1997).

2. Paramagnéticos: este fenómeno consiste en aplicar un campo magnético para los momentos magnéticos y polarizar hacia la dirección del campo. Se induce una magnetización proporcional a la intensidad del campo aplicado y paralela a su dirección (Lowrie, 2007). Tienen susceptibilidades positivas débiles pero debido a la sensibilidad y resolución mejorada de magnetómetros es posible su detección (Clark, 1997).

3. Ferromagnéticos: cuando se aplica un campo magnético, el momento magnético reacciona al unísono al campo magnético, dando lugar a una clase de fuerte comportamiento magnético (Lowrie, 2007), generando así valores altos de SM.

Desde la década de 1980, la SM se ha utilizado cada vez más en los registros de sedimentos recientes como un proxy paleoclimático (Da Silva *et al.*, 2013) debido a que refleja las variaciones en la erosión de las cuencas hidrográficas (Vázquez *et al.*, 2017) así como el transporte de material durante el acarreo de agua.

Los análisis de SM fueron realizados en el Instituto de Geofísica Unidad Morelia perteneciente a la UNAM; se midió en las 54 muestras en cubos de plástico de 8 cm³ correspondientes a los 217 cm de la secuencia sedimentaria. El instrumento empleado para

la medición fue el sensor Bartington modelo MS2B en alta frecuencia (HF, por sus siglas en Ingles) y en baja frecuencia (LF) y el susceptibilmetro Bartington MS3; para decodificar los datos obtenidos se usó el programa de cómputo Bartsoft.

III.IV. Determinación de materia orgánica

El carbono orgánico (CO), es la fracción que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos, constituye un elemento clave del ciclo global del carbono a través de la atmósfera, vegetación, suelo, ríos y océano (IUSS, 2007), y es influenciado por el clima, la topografía, el material parental, la vegetación y el tiempo (Hans, 1961).

Para su determinación se realiza la técnica que consiste en oxidar una porción de la muestra con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en ácido sulfúrico (H_2SO_4), utilizando el calor exotérmico del ácido; posteriormente se añade ácido fosfórico (H_3PO_4) para prevenir interferencias de Fe_{3+} , y finalmente el dicromato se titula con una solución de sulfato ferroso ($FeSO_4$). No obstante que este método fue desarrollado por Walkley y Black en 1934 para determinar carbono orgánico en suelos, este ha sido aplicado también para sedimentos marinos y lacustres (Gaudette *et al.*, 1974). Para su análisis se involucran los siguientes pasos:

1. Pesar 0.500 g de suelo seco y colocarlo en un matraz Erlenmeyer de 500 ml,
2. Procesar un blanco con reactivos por triplicado.
3. Adicionar 10 ml de dicromato de potasio 1 N girando el matraz cuidadosamente para que entre en contacto con la muestra.
4. Agregar cuidadosamente con una bureta 20 ml de H_2SO_4 concentrado a la suspensión, girar nuevamente el matraz y girar de esa forma durante un minuto.
5. Dejar reposar durante 30 minutos sobre una lámina de asbesto o sobre una mesa de madera, evitando las mesas de acero o cemento.
6. Añadir 20 ml de agua destilada.
7. Añadir 5 ml de H_3PO_4 concentrado.
8. Adicionar de 5 a 10 gotas del indicador de difenilamina.

9. Titular con la disolución de sulfato ferroso gota a gota hasta un punto final de color verde claro.

Una vez realizada la técnica, se procede a cuantificar el porcentaje de CO para cada muestra, ya que este será necesario para conocer el contenido de materia orgánica en cada una de ellas.

La fórmula requerida para conocer el contenido de CO es:

$$\% C \text{ Orgánico} = \left[\frac{BT}{g} \right] (N)(0.39)mcf$$

Donde:

B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (ml).

T = Volumen del sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml).

N = Normalidad exacta del sulfato ferroso (valorar por separado al momento de analizar las muestras).

g = Peso de la muestra empleada (g).

mcf = factor de corrección de humedad.

La fórmula empleada para determinar el contenido de materia orgánica es:

$$\% \text{ Materia Orgánica} = \% C \text{ orgánico} \times 1.72$$

Debido al alto contenido de materia orgánica (MO) en las muestras LOB-I-(50-54) y LOB-I-(58-64) el procedimiento se realizó pesando 0.250 g de muestra puesto que la combustión generada con 0.500 g impidió realizar una óptima titulación del dicromato de potasio.

La determinación de materia orgánica fue realizada en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la UNAM en el laboratorio de Agua y Suelo, se analizaron un total de 31 muestras.

III.V. Propiedades geoquímicas y radiogénicas

III.V.I. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Esta técnica se basa en la excitación de una muestra por rayos X en donde un haz primario de rayos X excita rayos X secundarios, generando longitudes de onda características de los elementos presentes en la muestra. La intensidad de los rayos X secundarios se usa para determinar las concentraciones de los elementos presentes (Rollinson, 1993).

La FRX nos ayuda a conocer las concentraciones de los elementos químicos presentes en los sedimentos y con ello diferentes características relacionadas con la cuenca de drenaje como la escorrentía. Las concentraciones de Ti, K y Zr estiman la abundancia de minerales clásticos (es decir, silicatos, óxidos y minerales de arcilla). Los eventos de evaporación pueden ser deducidos usando los contenidos de Ca y Sr ya que reflejan la abundancia de carbonatos (Vázquez *et al.*, 2017).

Las muestras fueron tomadas cada 8 centímetros de distancia de la secuencia sedimentaria, para su preparación fue necesaria secarlas en horno a 50°C por dos semanas, posteriormente se trituraron con un mortero de ágata hasta una fracción de arcilla y finalmente se empacaron en una cápsula de plástico y taparon con película fotográfica.

Este análisis fue realizado en el Instituto de Geología de la UNAM en el laboratorio de Paleoambientes, se utilizó un espectrómetro marca Niton FXL 950 y calibrado con la muestra estándar de la USGS SdAR-M2. Se analizaron un total de 31 muestras en las cuales se midieron tanto elementos mayores (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, K como elementos traza (Zr, Rb, Sr y Zn); de los cuarenta elementos que detecta el equipo únicamente se tomaron en cuenta doce, los cuales funcionan como indicadores geoquímicos.

III.V.II. Fechamiento por isótopos radiogénicos

El método de datación por radiocarbono (^{14}C) es una herramienta muy útil para desarrollar cronologías del Cuaternario. El ^{14}C alcanza una escala de tiempo de hasta 5,000 años motivo por el cual la mayoría de las reconstrucciones climáticas son referentes al Holoceno y Pleistoceno (Bernal, 2010). Es elemental atribuirle a la escala de tiempo cambios ambientales para conocer la dinámica evolutiva.

El ^{14}C se forma principalmente por la reacción entre los neutrones resultantes de la radiación cósmica y los átomos de nitrógeno del aire que se lleva a cabo en la atmósfera superior. Al ser un isótopo radiactivo, el radiocarbono decae de manera espontánea emitiendo una partícula beta negativa y transformándose en un átomo de ^{14}N (Bernal, 2010).

En este estudio el establecimiento de la escala de tiempo de la columna sedimentaria se realizó con dos muestras enviadas para la determinación de fechamientos por ^{14}C . Para realizar el procedimiento fue necesario el uso de guantes y espátula de aluminio para evitar cualquier tipo de contaminación; se requirieron 50 g de muestra para cada profundidad (213 cm y 102 cm), se empacaron por separado en papel aluminio y se rotularon. Posteriormente fueron guardadas en una caja de cartón con los respectivos permisos para su envío a Miami, EUA, el laboratorio encargado del fechamiento fue International Chemical Analysis Inc.

III.V.III. Tasa de sedimentación

Las cuencas sedimentarias son áreas en la superficie terrestre en las que se depositan cantidades de sedimentos, esto implica la existencia de áreas cercanas que estén sometidas a procesos de erosión y que son las fuentes que producen los sedimentos que se acumulan en dichos lugares (Carenas *et al.*, 2014). Para conocer la relación entre la cantidad de material acumulado a lo largo de tiempo, se utiliza la siguiente fórmula para conocer la tasa de sedimentación del sitio de estudio.

$$V = \frac{\Delta \text{distancias}}{\Delta \text{tiempo}} = \frac{\text{profundidad de muestras datadas (mm)}}{\text{años obtenidos por datación (año)}}$$

IV. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las metodologías aplicadas para el estudio de la columna maestra. Esta sección se divide en cinco apartados, el primero comprende la descripción de las propiedades físicas de los sedimentos; el segundo apartado se basa en la representación y explicación de la columna estratigráfica obtenida; en el tercero se presenta la explicación de la susceptibilidad magnética; el cuarto apartado corresponde a la exposición de los resultados del contenido de materia orgánica y finalmente el quinto apartado engloba las características geoquímicas.

IV.I. Propiedades físicas

IV.I.I. Granulometría

De acuerdo a la prueba de tacto realizada para la estimación de la granulometría (Figura IV.1), se obtuvo que el principal componente es la arena con un promedio de 41.48%, en seguida el limo con un promedio de 35.74% y finalmente la arcilla con un promedio de 22.77%. A lo largo de la secuencia maestra se observan ocho zonas de interés. En la primera zona (2.17 – 1.85 m) los tres tamaños de grano presentan un comportamiento lineal próximas a la línea promedio. La segunda zona (1.85 – 1.56 m) se distingue por un decremento en la concentración de arena con amplitud de onda larga y período largo y ganancia en la arcilla con amplitud de onda larga y período largo; el limo mantiene la concentración. En la tercera zona (1.56 – 1.27 m) la arena adquiere ganancia en el contenido presenta amplitud de onda corta al igual que el período, mientras que la arcilla baja su concentración con amplitud de onda larga y período largo, el limo continúa con el mismo comportamiento. La cuarta zona (1.27 – 1.18 m) se caracteriza por un alto contenido en arena, decremento en el limo y en la arcilla con amplitud de onda corta y período corto. En la quinta zona (1.18 – 0.94 m) se observa un comportamiento lineal en las tres fracciones de partículas, mientras que en la sexta zona (0.94 – 0.82 m) la concentración de arena baja y la concentración de la arcilla incrementan, con amplitud de onda corta al igual que el período, el limo mantiene su concentración.

En la séptima zona (0.82 – 0.46 m) se observa un incremento en la arena y un decremento en la arcilla con amplitud de onda larga y período largo, el limo mantiene su concentración. Finalmente, la octava zona (0.46 – 0.02 m) en donde la arena baja su porcentaje de concentración y la arcilla lo incrementa con amplitud de onda corta y período corto.

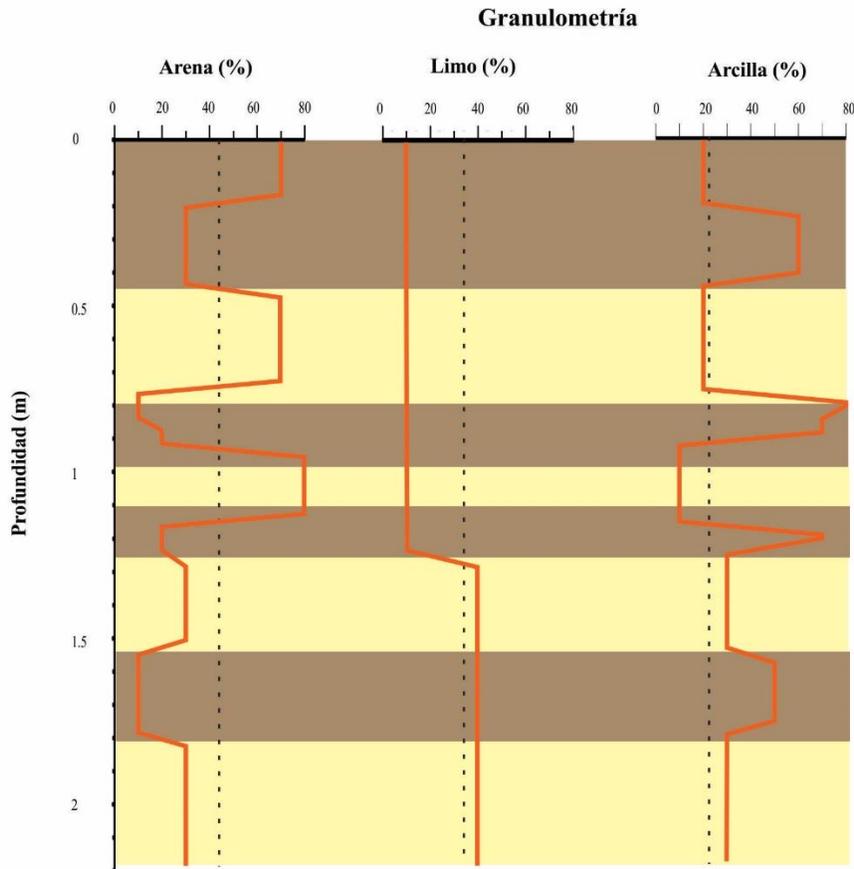
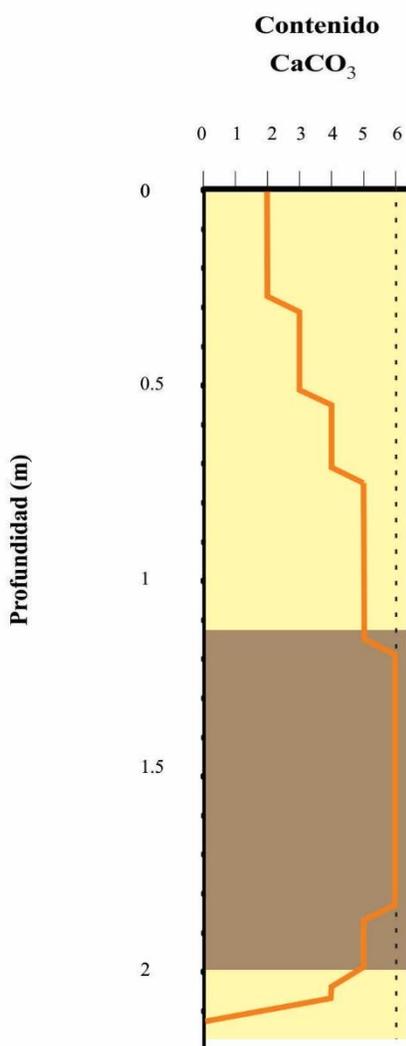


Figura IV.1. Concentraciones de los principales tipos de granos presentes en la columna maestra.

IV.I.II. Contenido de carbonatos

La evaluación de carbonatos (Figura IV.3) se encuentra entre el rango de libre de carbonatos a un contenido extremadamente alto, con una moda de concentración extremadamente alta. En la gráfica destaca una cresta (1.61 m) importante por su amplitud, se distinguen tres zonas de interés, por presentar características similares. La primera zona (2.17- 2.01 m) se caracteriza por tener una evaluación libre de carbonatos, y de forma lineal se va enriqueciendo gradualmente en carbonatos. La segunda zona (2.01- 1.18 m) se distingue por el alto contenido de CaCO_3 , presenta amplitud de onda larga y período largo, y finalmente la tercera zona (1.18 - 0.02 m) se observa un decremento en la concentración con amplitud de ondas cortas y períodos cortos.



IV.II. Propiedades magnéticas

IV.II.I. Susceptibilidad magnética

Las concentraciones de minerales magnéticos (Figura IV.3) exhiben comportamientos altamente heterogéneos a lo largo de la secuencia maestra. La intensidad de la K oscila entre valores de -8.77×10^{-5} SI a 9.19×10^{-5} SI y presenta un valor promedio de 2.37×10^{-5} SI. Se observan cuatro crestas importantes por su amplitud, así como cinco intervalos con características diferentes: el primer intervalo (2.17 – 2.01 m) se encuentra en la base de la columna en donde se presentan valores negativos de dicha propiedad; el segundo (2.01 – 1.61 m) posee valores positivos de K , con amplitud de onda corta y un período bajo; el tercer intervalo (1.61 – 1.14 m) tiene amplitudes de onda muy largas, con valores positivos, el período de esta zona es alto y representa el intervalo con los mayores valores de la secuencia analizada; el cuarto intervalo (1.14 – 0.9 m) se caracteriza por una pérdida en la intensidad generando un valle, la amplitud de onda y período largo; finalmente, el quinto intervalo (0.9 – 0.02 m) se caracteriza por tener amplitudes de onda muy cortas las cuales se aproximan a una línea recta, el período de onda que presenta es bajo y se encuentra dentro de los valores positivos con valores muy cercanos a la media.

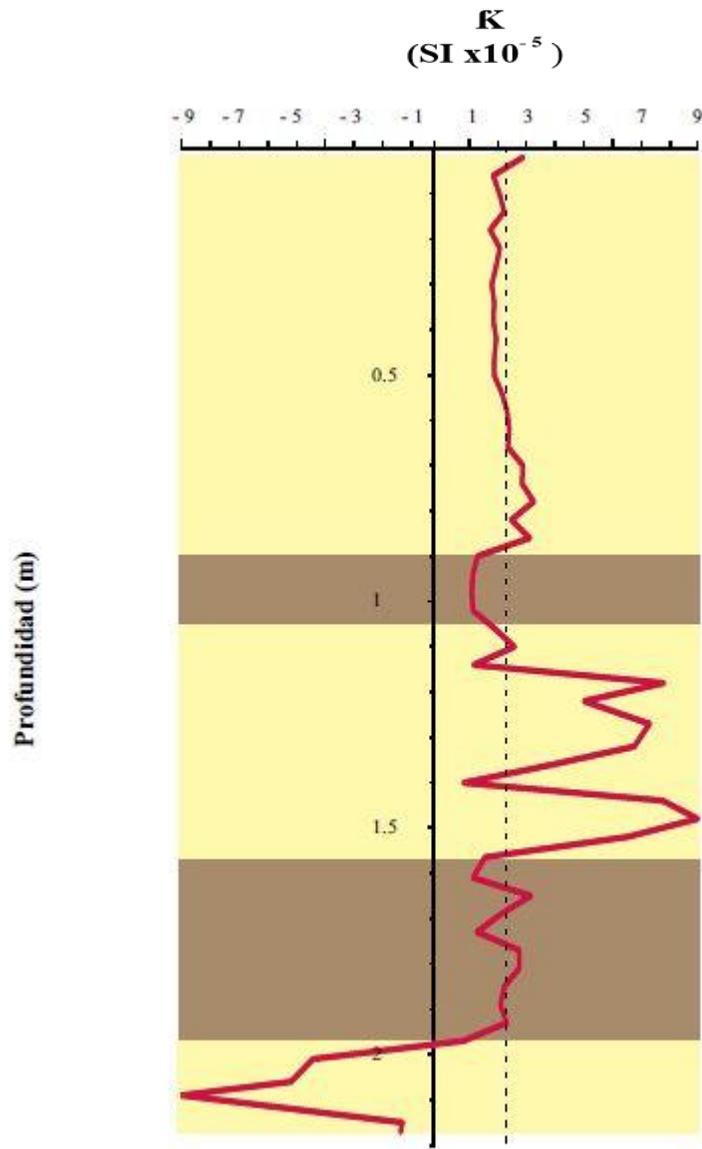


Figura IV.3. Variación de la susceptibilidad magnética de los sedimentos lacustres de LOB.

IV.III. Cantidad de materia orgánica

Los valores de concentración del contenido de MO (Figura IV.4) oscila entre 3 a 13.3% con un valor promedio de 8.5%. En la gráfica destacan dos valles (1.56 y 1.27 m) y dos crestas (1.22 y 0.9 m) importantes por su amplitud y por presentar características particulares, se diferencian cuatro sectores de interés. El primer sector (2.15 - 1.65 m) se distingue por presentar los valores más altos en la concentración de MO así como un posterior decremento en la concentración; en el segundo sector (1.65 - 1.27 m) se encuentran los valores más bajos del contenido de MO, se aprecian un intervalo de ganancia con amplitud de onda corta al igual que el período y dos intervalos de pérdida con amplitud de onda corta y larga, y períodos largos. En el tercer sector (1.27 - 0.9 m) se aprecia un intervalo de pérdida con amplitud de onda corta al igual que el período y dos intervalos de ganancia con amplitud de onda y período largo; y finalmente el cuarto sector (0.9 - 0.02 m) que posee un decremento constante en la concentración de materia orgánica.

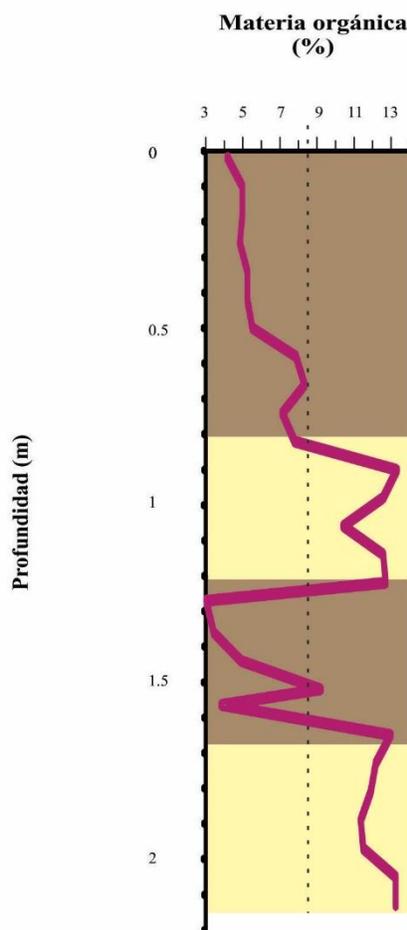


Figura IV.4. Variación de la concentración de materia orgánica a lo largo de la secuencia maestra.

IV.IV. Características geoquímicas

IV.IV.I. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Elementos mayores

➤ K

La concentración del potasio (Figura IV.5) oscila entre los 0.21 a los 0.78 % y presenta un valor promedio de 0.58 %. Se presentan tres crestas (1.81, 1.36 0.1 m) y dos valles (1.22 y 9.8 m) importantes por su amplitud. A lo largo de la secuencia maestra se observan tres zonas con las siguientes características: la primera zona (2.15 – 1.36 m) posee valores positivos altos, con amplitud de onda corta y períodos largos; dentro de esta zona se aprecia un sub intervalo (1.81 – 1.44 m) donde disminuye el porcentaje de concentración de K. La segunda zona (1.36 – 0.9 m) se caracteriza por tener bajos porcentajes de concentración de este elemento, posee amplitud de onda corta y períodos altos. Finalmente, la tercera zona (0.9 – 0.02 m) muestra un patrón de pérdida y ganancia de potasio de forma irregular, con amplitudes de ondas largas y períodos cortos.

➤ Al

La concentración del aluminio oscila entre los valores de 0.41 a 3.84 %, el valor promedio es de 2.66 %. En esta gráfica se observan tres crestas (1.81, 1.27 y 8.2 m) y un valle (9.8 m) los cuales son relevantes por su amplitud. Se aprecian cuatro zonas de interés las cuales poseen las siguientes características: la primera (2.15 – 1.65 m) se distingue por un patrón de pérdida y ganancia en la concentración del Al, con amplitud de ondas cortas y períodos cortos; la segunda (1.65 – 1.27 m) posee valores altos en la concentración, con amplitud de onda larga al igual que el período; la tercera (1.27 – 0.82 m) se caracteriza por una pérdida en la concentración del aluminio, aquí se encuentra el porcentaje más bajo de esta, con amplitud de onda larga y período largo; y finalmente la cuarta (0.82 -0.02 m) que se diferencia por tener tanto pérdida como ganancia en la concentración de este elemento, con amplitud de onda largo y período corto.

➤ **Si**

La concentración del silicio oscila entre los valores de los 6.63 a 23.92 %, con un valor promedio de 19.20 %. Se observan dos crestas (1.97 y 8.2 m) y dos valles (9.8 y 5.8 m) relevantes por su amplitud, así como tres zonas de interés las cuales contienen las siguientes características: la primera zona (2.15 – 1.14 m) se diferencia por tener los valores más altos y un decremento en la concentración del Si, con amplitudes de onda larga y período largo; la segunda zona (1.14 – 0.5 m) presenta los valores más bajos en la concentración del silicio con amplitudes de onda y períodos largos; mientras que la tercera zona (0.5 – 0.02 m) muestra una ganancia en la concentración de este elemento, con amplitudes de onda y períodos cortos.

➤ **Fe**

Los valores de concentración del Fe está dentro de 0.65 a 2.08 % y el valor promedio es de 1.54 %. Se observa un valle (9.8 m) importante por su amplitud, así mismo se aprecian tres sectores con las siguientes características: el primer sector (2.15 – 1.27 m) muestra un comportamiento cíclico de ganancia y pérdida en la concentración del hierro, se aprecia que las pérdidas son menores respecto a las ganancias, con amplitud de onda corta y período largo; el segundo sector (1.27 – 0.82 m) muestra un decremento en la concentración, con amplitud de onda y período largo. Finalmente, el tercer sector (0.82 – 0.02 m) se diferencia por tener tanto ganancia como pérdida en la concentración del Fe, con amplitud de onda y período corto.

➤ **Ti**

Los valores del titanio oscilan entre los 0.09 a los 0.42% y su valor promedio es de 0.30%. En la gráfica destacan tres crestas (1.81, 8.2 y 4.2 m) y un valle (9.8 m) por su amplitud y se distinguen cuatro zonas de interés: la primera zona (2.15 - 1.73 m) presenta tanto pérdida como ganancia en la concentración del Ti, en donde la ganancia es mayor que la pérdida, con amplitud corta y largos períodos; la segunda zona (1.73 – 1.27 m) se caracteriza por tener altos valores en la concentración del titano, con amplitud de onda larga y período largo.

La tercera zona (1.27 – 0.5 m) se diferencia por poseer bajos contenidos de titanio, con amplitudes de onda largas y períodos largos; mientras que la cuarta zona (0.5 – 0.02 m) se caracteriza por tener incremento y decremento en la concentración de este elemento, con amplitud de onda corta y período corto.

➤ **Ca**

Oscila entre los valores de 1.74 al 15.80 % con un valor promedio de 5.28%. A lo largo de la columna maestra se observa un valle (1.27 m) y una cresta (9.8 m) importantes por su amplitud, y tres zonas de interés por las características que presentan. En la primera zona (2.15 – 1.27 m) se muestran intervalos con pérdida de concentración del Ca las cuales presentan amplitud de onda larga y períodos largos mientras que los intervalos con ganancia en la concentración de Ca son de amplitud corta al igual que el período; la segunda zona (1.27 – 0.9 m) se caracteriza por poseer valores muy altos en la concentración del Ca, con amplitud de onda larga y período largo, y finalmente la tercera zona (0.9 – 0.02 m) se distingue por tener intervalos de ganancia y pérdida del elemento, se observa que es en esta zona donde se encuentra el valor más bajo del calcio, con amplitud de onda corta y período corto.

➤ **Mn**

Al igual que el Ti, el Mn no llega al 1%, los valores oscilan del 0.01 al 0.02 % y el valor promedio es de 0.01 %. Se muestra un valle (1.36 m) y una cresta (9.8 m) importantes por su amplitud. Destacan tres zonas con características particulares: la primera zona (2.15 – 1.14 m) muestra una alternancia entre pérdida y ganancia del Mn, si bien las ondas de pérdida son de amplitud larga y períodos largos mientras que las ondas de ganancia son de amplitud corta y períodos cortos, esta zona contiene el punto más bajo en manganeso. La segunda zona (1.14 – 0.9 m) se caracteriza por un constante enriquecimiento en Mn y presenta el punto más alto en concentración, con amplitud de onda larga y período largo mientras que la tercera zona (0.9 – 0.02 m) presenta alternancia entre pérdida y ganancia en este elemento con amplitud de onda corta y período corto.

➤ **Mg**

El rango de concentración oscila entre los 0.60 % a los 1.89 %, presenta un valor promedio de 1.08 %. Se aprecian dos crestas (1.56 y 9.8 m) importantes por su amplitud y por sus características se distinguen cinco zonas de interés. La primera zona (2.15 – 1.65 m) presenta intervalos de ganancia con amplitud de onda larga y períodos cortos, así como intervalos de período de concentración con amplitud de onda corta y período largo. La segunda zona (1.65 – 1.14 m) se diferencia por poseer intervalos de ganancia con amplitud de onda corta y períodos largos, así como intervalos de períodos de pérdida con amplitud de onda larga y períodos largos. La tercera zona (1.14 – 0.9 m) muestra un enriquecimiento constante de Mg y en ella se ubica el punto más alto en la concentración de este elemento, con amplitud de onda y período largo. En la cuarta zona (0.9 – 0.42 m) se aprecian intervalos de ganancia con amplitud de onda larga y período corto, mientras que los intervalos de pérdida poseen amplitudes de onda cortas y períodos largos. Finalmente, la quinta zona (0.42 – 0.02 m) en donde los intervalos de ganancia presentan amplitud de onda corta y período largo, mientras que los intervalos de ganancia tienen amplitud de onda larga y períodos largos.

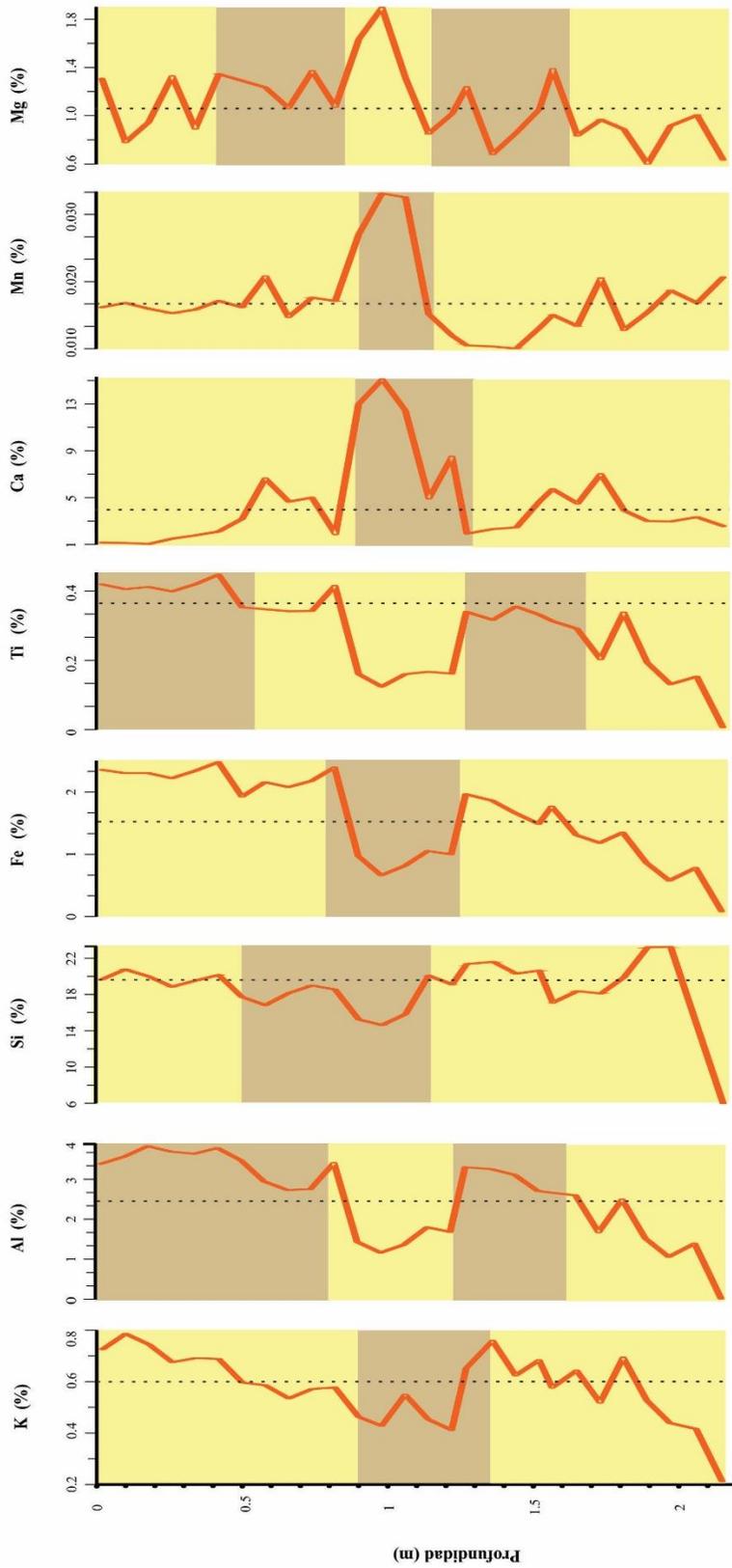


Figura IV.5. Variación de la concentración de elementos mayores en los sedimentos lacustres de LOB.

Elementos trazas

➤ Rb

La concentración del rubidio (Figura IV.6) oscila entre los 7.79 ppm a los 73.96 ppm y presenta un valor promedio de 52.70 ppm. Se observa dos valles (1.06 y 6.6 m) importantes por su amplitud y por sus características particulares se identifican tres zonas de interés. La primera zona (2.15 – 1.27 m) presenta intercalaciones de pérdida y ganancia en la concentración del rubidio con amplitud de onda corta y períodos cortos, esta zona contiene los valores más altos de Rb. La segunda zona (1.27 – 0.5 m) se distingue por una continua pérdida de este elemento, con amplitud de onda larga y períodos largos, se aprecia que en esta zona se encuentran los valores más bajos de Rb. Finalmente, la tercera zona (0.5 – 0.02 m) en donde hay un incremento en la concentración, con amplitud de onda corta y período corto.

➤ Sr

La concentración del estroncio oscila entre los 131.34 ppm a los 745.24 ppm y presenta un valor promedio de 281.51 ppm. En esta gráfica resalta una cresta (1.06 m) por la amplitud de la onda y por presentar características similares se identifican tres zonas de interés, la primera zona (2.15 – 1.27 m) se caracteriza por tener incrementos y decrementos en la concentración del Sr, con amplitud de onda corta y períodos cortos; la segunda zona (1.27 – 0.9 m) se distingue por un enriquecimiento continuo de estroncio, con amplitud de onda larga y período largo; y finalmente la tercera zona (0.9 – 0.02 m) se presenta nuevamente una intercalación de pérdida y ganancia en este elemento, con amplitud de onda corta y períodos cortos.

➤ **Zr**

La concentración del circonio oscila entre los 54.94 ppm a los 366.93 ppm, tiene un valor promedio de 227.52 ppm. Se distingue una cresta (1.44 m) y dos valles (1.06 y 0.74 m) importantes por sus amplitudes y, por las características que presentan se aprecian tres sectores de interés: el primer sector (2.15 – 1.27 m) se caracteriza por tener el valor más bajo del circonio y valores altos, con amplitud de onda larga y período largo; el segundo sector (1.27 – 0.5 m) se diferencia por tener concentraciones bajas de Zr, con amplitud de onda larga y períodos largos; y finalmente el tercer sector (0.5 – 0.02 mm) se observa intercalaciones de pérdida y ganancia en la concentración de este elemento, con amplitud de onda y período cortos.

➤ **Zn**

La concentración del zinc oscila entre los -15.60 ppm a los 271.44 ppm y presenta un valor promedio de 112.01 ppm. Se aprecian dos crestas (1.81 y 1.56 m) importantes por su amplitud, y por las características similares que presentan se pueden identificar dos sitios de interés. El primer sitio (2.15 – 1.56 m) se diferencia por tener incrementos constantes en la concentración del Zn, en ella se presentan los puntos más altos de este elemento, con amplitud de onda corta y períodos largos; mientras que el segundo sitio (1.56 – 0.02 m) se caracteriza por tener constantes pérdidas en zinc, con amplitud de onda larga y períodos cortos.

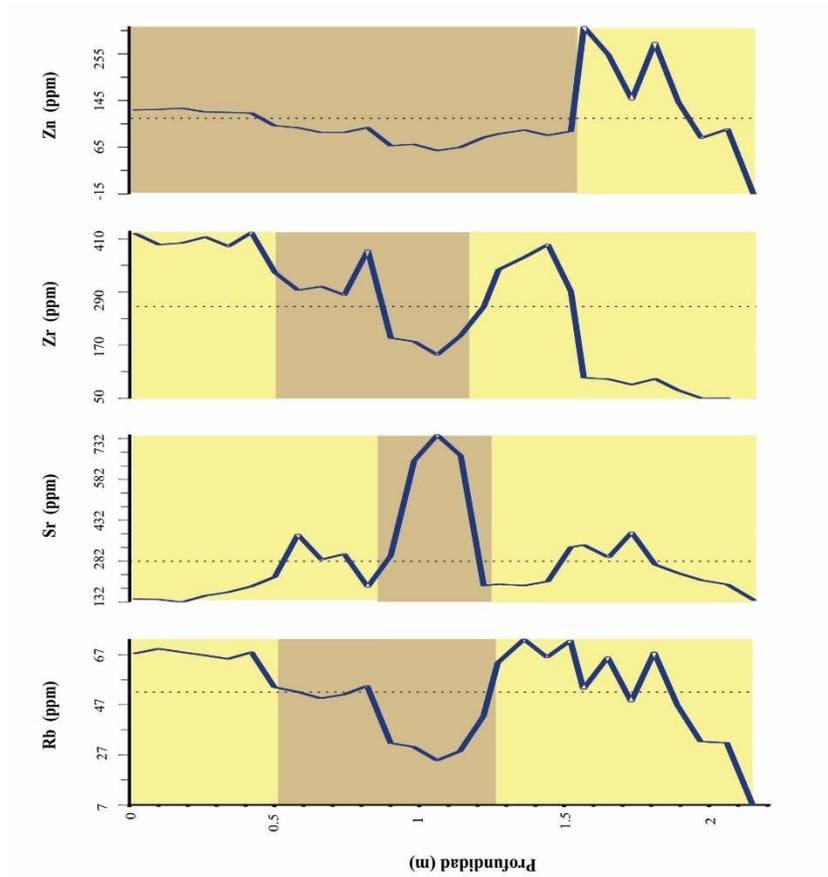


Figura IV.6. Variación de la concentración de elementos trazas en los sedimentos lacustres de LOB.

IV.IV.II. Fechamientos radiogénicos y modelo de edades

El análisis de ^{14}C de la muestra enviada para su datación presenta una edad de 11,810 +/- 30 AP, ésta misma edad fue calibrada con el software Calib 7.1 a edad calendario (Tabla VI). El modelo de edades de la columna maestra se obtuvo asumiendo que la muestra superficial pertenece al ambiente actual y que los sedimentos ubicados a los 2.13 m fueron depósitos hace 11,697 años, con base en ello se calculó la tasa de sedimentación la cual tiene un valor de 0.156 mm/año. La máxima edad que se obtuvo para dicha columna es de 13,903 años AP a los 2.17 m (Figura IV.7) que corresponde a la base de la secuencia sedimentaria.

Tabla VI. Resultados del análisis radiogénico en sedimentos orgánicos

Muestra	Profundidad	Edad ^{14}C	Edad Calibrada (AP)
LOB-I-58-64	2.13 m	11810 +/- 30 AP	11697

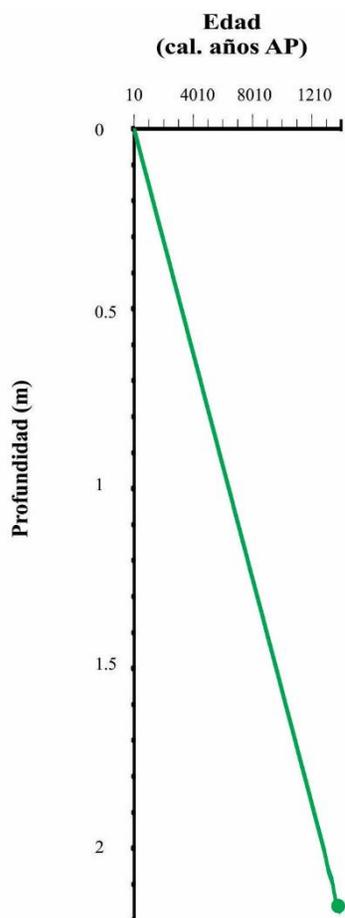


Figura IV.7. Modelo de edades para la secuencia maestra de LOB.

IV.V. Columna estratigráfica

La columna maestra (Figura IV.8) consta de diez unidades, las cuales fueron determinadas a partir de cambios en la granulometría, color y procesos pedogenéticos. A continuación se hace la descripción de cada unidad

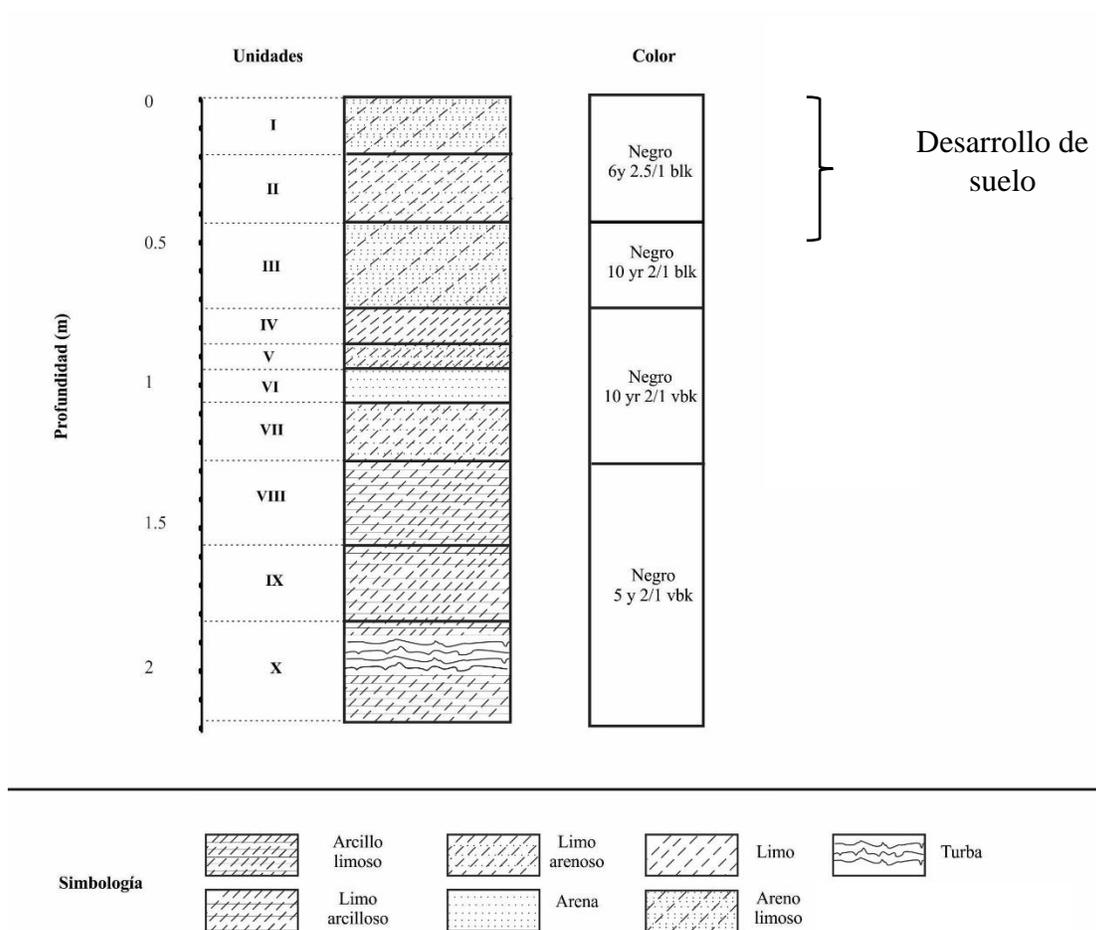


Figura IV.8. Columna estratigráfica para los sedimentos de La Otra Banda, Jalisco; la porción del suelo se distingue por el desarrollo de procesos pedogenéticos.

- Unidad X (2.17 – 1.81 m): presenta sedimentos arcillo-limosos de color negro, dicha unidad contiene un estrato rico en humus.
- Unidad IX (1.81 - 1.56 m): compuesta por sedimentos limo-arcillosos de color negro.
- Unidad VIII (1.56 – 1.27 m): se conforma de sedimentos arcillo-limosos de color negro.
- Unidad VII (1.27 – 1.18 m): se compone de sedimentos limo-arenosos de color negro. A nivel microscópico se observan escasos ejemplares de diatomeas del grupo pennal.
- Unidad VI (1.18 – 0.94 m): compuesta por sedimentos arenosos de color negro, a nivel microscópico se observan espículas de esponja (Figura IV.17).
- Unidad V (0.94 – 0.86 m): compuesta de sedimentos limo arenosos de color negro, Unidad IV (0.86 – 0.78 m): se compone de sedimentos limosos de color negro
- Unidad III (0.78 – 0.46 m): se compone de sedimentos areno-limosos de color negro. A nivel microscópico se observa la presencia de diatomeas de tipo pennal. A los 0.50 m de profundidad se observa el desarrollo del suelo.
- Unidad II (0.46 – 0.22 m): conformada por sedimentos limo-arenosos de color negro. A nivel microscópico se observan diatomeas de tipo pennal. En esta unidad se observa desarrollo de suelo.
- Unidad I (0.22 – 0.02 m) se compone de sedimentos areno-limosos de color negro y están sometidos a constantes movimientos de labranza. A nivel microscópico se observan diatomeas de tipo pennal (Figura IV.18). En esta unidad se observa desarrollo de suelo.

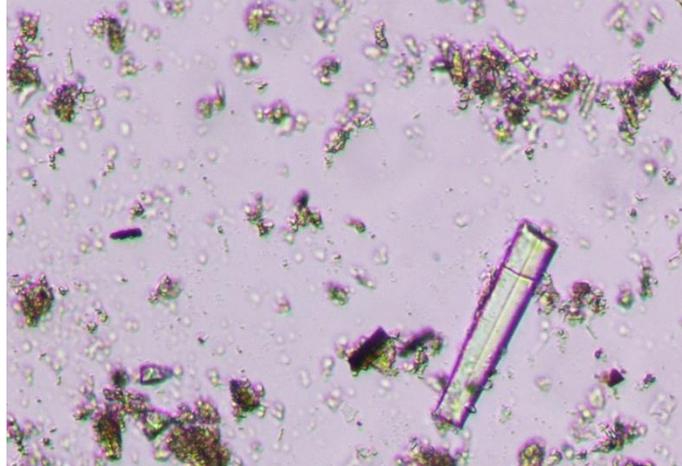


Figura IV.17. Ejemplificación de las espículas de esponja observadas en microscopio.

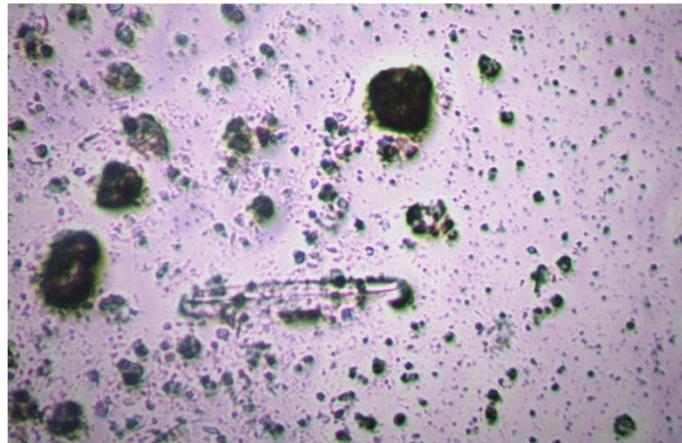


Figura IV.18. Ejemplificación de diatomea tipo pennal observada en microscopio.

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

V.I. Correlación de edades (cronocorrelación)

Un elemento fundamental para la interpretación paleoclimática y paleoambiental es tener correctamente calibrada la escala temporal de los registros analizados, esto nos permite entender el período y/o época de la escala geológica del tiempo analizado para poder situar los eventos climáticos conocidos y sus efectos a lo largo del mismo. Para tal efecto, en este trabajo se realizó una correlación de fechamientos entre el sitio cercano SJE (Vázquez *et al.*, 2017) dentro de la misma cuenca de depósito, con la finalidad de integrar más fechas a nuestro modelo de edades y poder proponer uno nuevo con mayor detalle para nuestro sitio que cubre un mayor período de tiempo. En la figura V.1 se observa la ubicación dentro de la misma cuenca tanto del sitio de estudio previo (SJE) como el del presente trabajo (LOB).

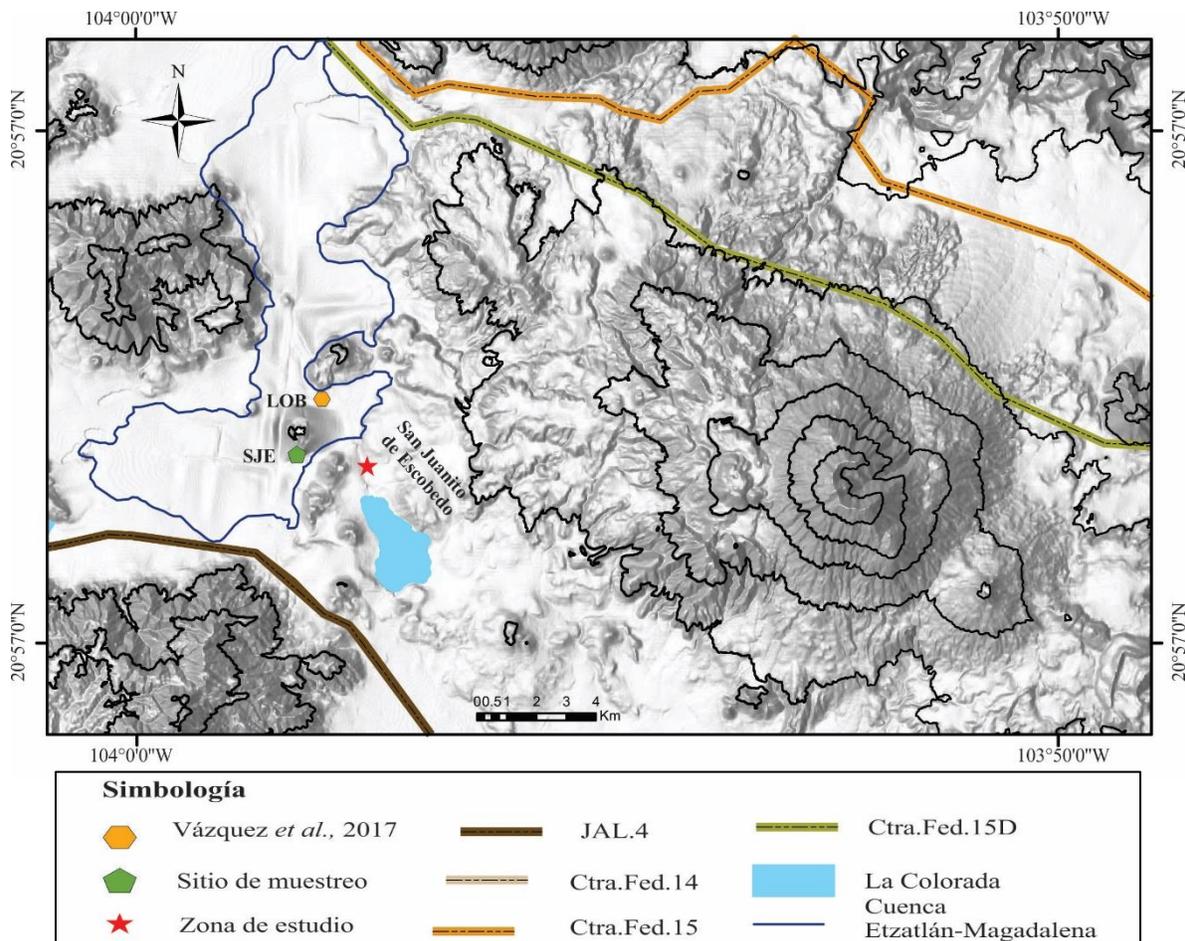


Figura V.1. Ubicación de ambos sitios dentro de la cuenca Etzatlán-Magdalena.

Se realizó una correlación por medio de sus curvas de SM, utilizando el método de superficies marcadoras o capas guía que pudieron observarse en ambos registros (figura V.2). Una vez obtenidos los puntos, se identificaron fechamientos en la columna de SJE y posteriormente se proyectaron en la columna de LOB, es importante señalar que la intención de realizar este proceso fue para minimizar el rango de error del modelo de edad obtenido anteriormente en este trabajo con una sola fecha en la base del mismo.

Esta correlación permitió observar que a pesar de estar en la misma cuenca de depósito, ambos sitios presentan diferente resolución de SM, lo que sugiere diferentes características de sedimentación, además de que el sitio LOB abarca desde un intervalo de tiempo mayor, desde el Pleistoceno tardío, mientras que en SJE solo se cuenta con el registro desde el Holoceno inferior. En cuanto al comportamiento de la SM en ambos sitios, esa presenta una señal en términos generales similar, con algunas diferencias en resolución y amplitud de ondas, lo que sugiere que a pesar de la distancia entre estos dos sitios había una actividad “homogénea” dentro de la cuenca.

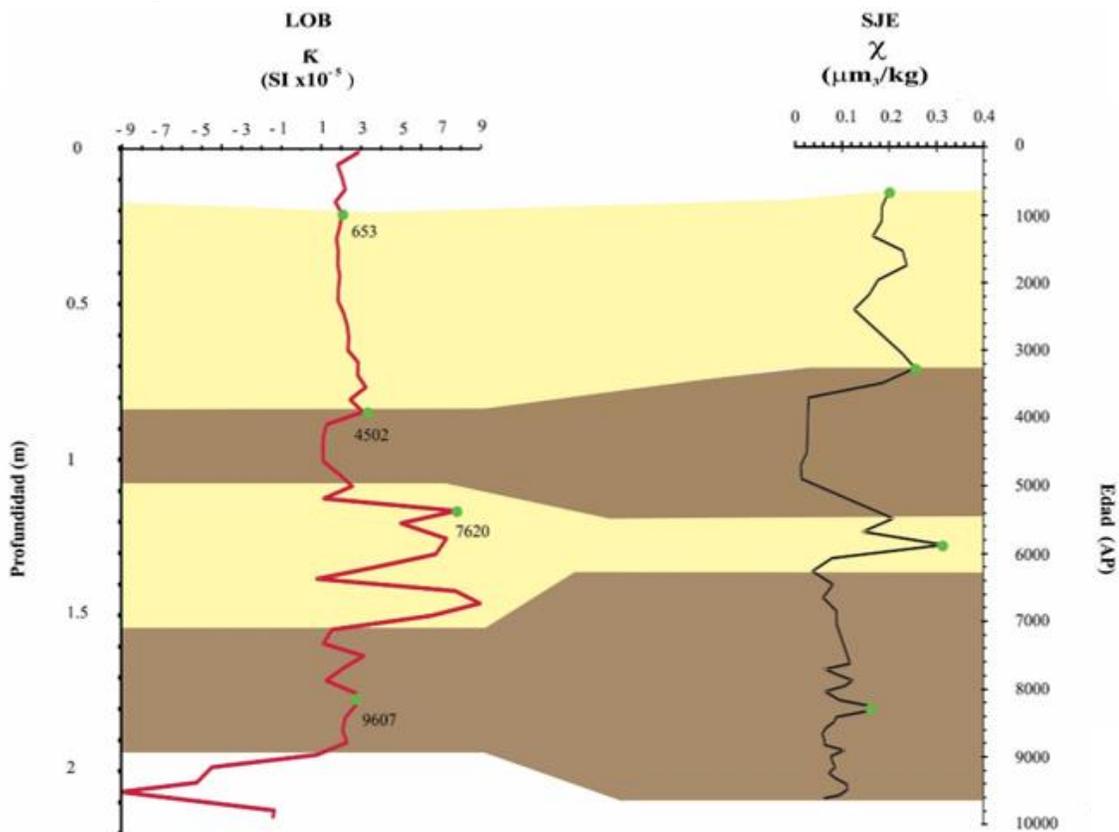


Figura V.2. Correlación entre los registros LOB y SJE. Se observan las superficies marcadoras indicadas en franjas que unen ambas secuencias y también se indican los puntos de fechamiento en la secuencia SJE (puntos verdes) que fueron trasladados a la secuencia LOB por medio de la correlación.

En términos de tiempo, la secuencia del presente estudio (LOB) comprende desde el Pleistoceno tardío (ca. 14, 141 años cal AP) hasta el Holoceno superior, siendo una secuencia sin interrupción de sedimentación por lo que la relevancia de este estudio recae en que permiten observar el cambio ocurrido en transición Pleistoceno-Holoceno. Lo anterior es clave para los estudios paleoclimáticos y paleoambientales, debido a los cambios significativos ocurridos en el clima a nivel mundial y del registro del poblamiento humano.

La SM en la secuencia LOB muestra cuatro fases de aporte de detríticos a la cuenca, lo cual nos habla de un cambio en la dinámica atmosférica y/o ambiental. La primera fase cubre toda la última fase del Pleistoceno y la transición Pleistoceno-Holoceno presente en nuestra columna (2.17 – 1.81 m, ca. 14,141 – 9,607 AP) y corresponde a una etapa en la que los minerales ferromagnéticos son escasos (valores negativos y muy pequeños de SM, Tipler y Mosca, 2007) y esto se relaciona con una baja proporción de materiales detríticos acarreados a la cuenca. Lo anterior sugiere que las condiciones de erosión no fueron las óptimas para el acarreo de materiales, esta etapa posiblemente esté relacionada con el proceso climático global asociado a la última glaciación en la Tierra. La segunda fase presente en la SM se encuentra entre 1.80 – 1.22 m, ca. 9,607 - 7,620 AP y representa el inicio de una etapa de aporte detrítico a la cuenca de manera considerable, pero aún baja, de acuerdo con los valores bajos de SM. La fase tres (1.22 – 0.86 m, ca. 7,620 – 4,502 AP), está representada por la etapa de mayor aporte detrítico a la cuenca reflejado por los altos valores de SM, lo que sugiere un cambio considerable en las condiciones ambientales de la cuenca y por tanto en los patrones erosivos de la misma. Finalmente, la fase cuatro (0.86 – 0 m, ca. 7,620 – 0 AP), corresponde con una etapa de sedimentación similar a la fase dos, donde existe algo de erosión, sin embargo, es en baja proporción. En términos paleoambientales implica que los agentes de erosión y transporte han permanecido activos durante el Holoceno tardío, esta situación posiblemente esté asociada con las condiciones cálidas que ha presentado el planeta en este período.

V.II. Modelo de edades y tasas de sedimentación

El nuevo modelo de edades (figura V.3), fue establecido a partir de cuatro fechamientos correlacionados del trabajo de Vázquez et al. (2017) y un nuevo fechamiento realizado por este trabajo (Tabla VII), lo cual nos permite separar nuestra secuencia en períodos y épocas más precisas para establecer las características ambientales desde el Pleistoceno tardío a la actualidad.

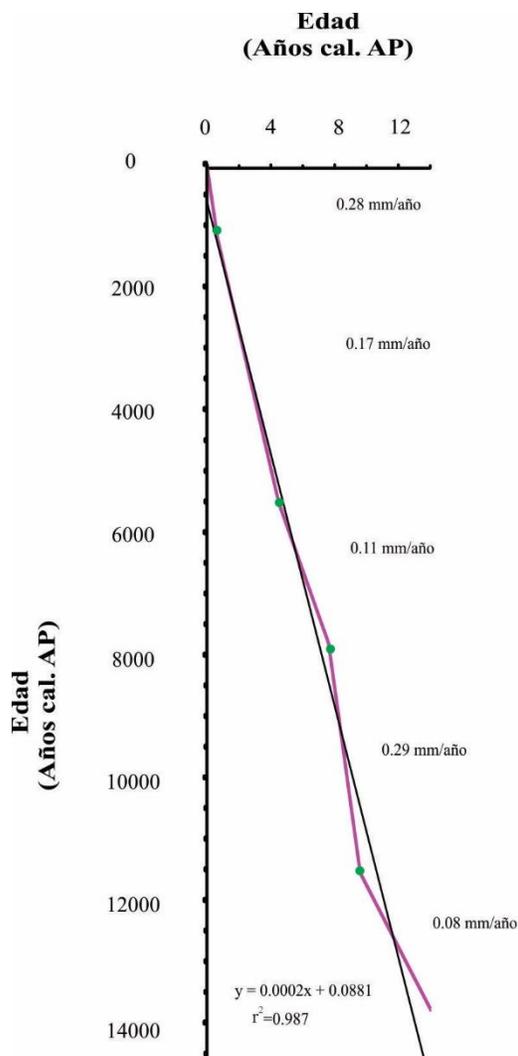


Figura V.3. Modelo de edades establecido con cinco fechamientos para la secuencia LOB, el cual presenta un factor de correlación entre fechamientos $r^2=0.987$ que le da una alta confiabilidad a la correlación establecida. Se presenta las tasas de sedimentación calculadas entre fechamientos consecutivos.

Tabla VII. tasas de sedimentación

Profundidad (m)	Años (AP)	Tasas de sedimentación (mm/años)
0	10	0.28
0.18	653	0.17
0.86	4,502	0.11
1.22	7,620	0.29
1.81	9,607	0.08

Con base en los fechamientos consecutivos se calcularon nuevas tasas de sedimentación más precisas para los distintos intervalos que cubre este estudio, encontrándose el valor más bajo en la base de la secuencia (0.08 mm/año, 2.17 - 1.97 m, Pleistoceno tardío), lo que podría estar relacionado con una alta compactación, sin embargo, la presencia de otro intervalo en la zona intermedia de la secuencia entre 1.22 y 0.86 m con una tasa de 0.11 mm/año (Holoceno medio), indicaría que la alta compactación no ha sido uniforme, por lo que podríamos descartar dicho proceso, por lo anterior, se puede relacionar a una escasez de ingreso de materiales a la cuenca, y por tanto con baja erosión en la cuenca. La mayor tasa de sedimentación se encuentra en el intervalo entre estos dos mencionados (1.97 - 1.22 m) con 0.29 mm/año, lo que indicaría para el Holoceno inferior una gran cantidad de materiales sedimentándose en el lago. Este mismo proceso sucede en la cima de la secuencia para el intervalo encontrado entre los 0.18 y 0 m de profundidad (0.28 mm/año), sin embargo, en este intervalo se puede asociar a un retrabajo del material por actividades agrícolas que en ocasiones agregan tierra más rica en minerales para mejorar los cultivos.

Al comparar entre SJE y LOB, se observa un contraste que en SJE la tasa de sedimentación para el Holoceno inferior es de 0.24 mm/años (la más alta de la secuencia), mientras que para LOB es de 0.08 mm/año (la más baja), esto posiblemente asociado a que nos encontramos en diversos subambientes del fondo lacustre, y como sabemos la sedimentación en este tipo de ambientes es concéntrica con mayor proporción de materiales para zonas litorales. En términos generales se observa que en SJE la tasa de sedimentación

disminuye a lo largo del tiempo y en LOB la tasa presenta una ciclicidad entre valores bajos/altos, también posiblemente asociada a su posición distinta dentro del lago.

V.III. Correlación litoestratigráfica de secuencias dentro del lago

Esta correlación se ha realizado a partir de la comparación entre la columna maestra de SJE (Vázquez et al., 2017) y la columna maestra de LOB (el presente estudio), con la finalidad de identificar depósitos similares a lo largo del tiempo para diferentes sectores de la cuenca (figura V.4).

La asociación se realizó considerando tres segmentos correlacionables en ambas columnas sedimentarias, más dos segmentos no correlacionables, uno en la base y otro en la cima del sitio LOB. El segmento no correlacionable de la base corresponde al intervalo ocurrido entre ca. 14,140 y 9,600 AP el cual no tiene equivalente en tiempo con la secuencia SJE, por lo que no hay información para comparar el tipo de sedimentación.

El primer intervalo correlacionable (9,600 y 7,274 AP) se observa que ambas secuencias están compuestas principalmente de arcillas. En SJE hay un estrato de grava y una porción rica en limo, mientras que en LOB las unidades presentan un contenido alto de arcillas y una unidad rica en limo. Las coloraciones son distintas, en el sitio SJE el color predominante es marrón mientras que en LOB el color predominante es el negro. Lo que sugiere condiciones oxidantes en el sitio SJE, posiblemente asociado con circulación de agua con tirante de agua bajo, a diferencia de LOB donde posiblemente las condiciones fueron más reductoras sugiriendo un tirante de agua ligeramente mayor. Lo anterior posiblemente se asocia a un lago con fondo irregular permitiendo zonas con fondo más somero en contacto con corrientes de agua someras.

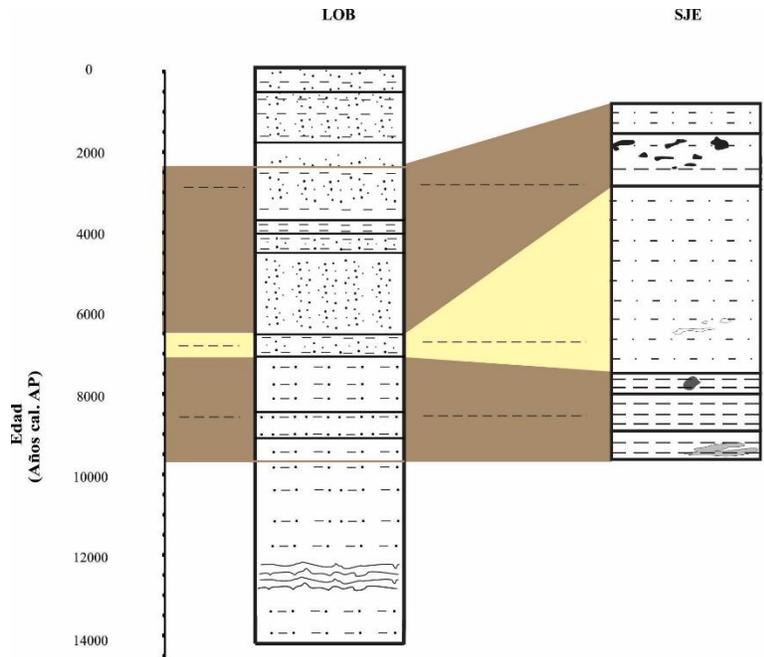


Figura V.4. Asociaciones de facies entre SJE y LOB

El segundo segmento (7,274 – 6,581 AP) está compuesto de limos y arcillas en baja concentración (SJE) y en LOB se compone principalmente de limos; un rasgo de relevancia de esta zona es que en LOB el espesor de esta unidad es menor en comparación con SJE, en relación al color en SJE aún prevalece la tonalidad marrón mientras que en LOB prevalece el color negro, lo que sugiere conservación de las condiciones oxidantes anteriormente mencionadas para la base de SJE.

En el tercer sector (6,581 – 2,464 AP) existen diferencias considerables, ya que a pesar de que ambas contienen limos, en SJE hay presencia de arcilla mientras que en LOB se mezcla con arenas; el color en ambas secuencias se conserva igual que en los anteriores intervalos.

El intervalo superior de LOB (2,464 – 0 AP) existe una secuencia de facies que no fueron correlacionables con SJE puesto que son estratos mayoritariamente de arenas mezcladas con arcillas de manera artificial por arado y en SJE no existe esa mezcla, sin embargo, se tiene erosionada la cima de la misma, lo que impide correlacionar, aunque la

erosión sea menor en SJE. Tener diferentes materiales poco correlacionables nos sugiere cambios laterales de facies por estar en diferentes zonas del lago y por tanto, a pesar de haber sedimentación simultánea, hay cambios laterales en el tamaño de partículas como normalmente ocurre en los ambientes lacustres.

V.IV. Interpretación geoquímica a lo largo del tiempo

V.IV.I. Comparación del suelo y sedimentos

Con base en la información descrita en campo, se pudo observar que la parte superior de la secuencia había sido mezclada con fines agrícolas, y el proceso de arado en el campo aledaño sugería alrededor de 40 o 50 cm de alteración de la columna; lo anterior sugirió la determinación en laboratorio de características físicas del suelo para determinar que parte de la columna había sido afectada por procesos que pudieran haber alterado considerablemente la secuencia e impedir una interpretación paleoambiental y paleoclimática de la misma.

El proceso pedogenético más importante es el desarrollo de agregados ya que ellos permiten la movilidad del agua, aire y nutrientes dentro de los materiales y las propiedades del sedimento se pierden con el aumento de este proceso; identificarlos dentro de nuestra secuencia sedimentaria nos indica la existencia de actividad edáfica que debe ser analizada geoquímicamente. Mediante las pruebas al tacto realizadas en toda la secuencia se pudo observar que en la cima se presenta la mayor formación de agregados y conforme se desciende en profundidad van disminuyendo en proporción, hasta desaparecer a una profundidad de 1.22 m. Lo anterior sugiere que las características sedimentarias de la secuencia han sido alteradas a lo largo del tiempo, en algunos casos de manera muy evidente (la cima) y conforme se desciende esto va desapareciendo. La identificación del punto máximo de acción de los procesos de intercambio de agua, aire y nutrientes se convierte en un punto sustancial de determinación para poder saber que parte de la secuencia puede ser utilizada con fines de interpretación paleoambiental (inalterada) y que parte se encuentra mezclada y puede asociarse más a actividades antrópicas, donde la información paleoambiental se ha perdido.

Para resolver este problema se utilizaron los datos geoquímicos determinados a profundidad en la secuencia. En los estudios paleoclimáticos es necesario identificar los elementos inmóviles y/o algunos semimóviles (Ti, Fe, Si, Al, Ca, k, Mn y Sr) debido a que estos tienen una mayor afinidad por la fase mineral sólida durante los procesos de intemperismo. Lo anterior brinda una herramienta muy útil para analizar los procesos ambientales del pasado sin pérdida de información, porque se mantienen de manera menos constante en los materiales acarreados por procesos fluviales en una cuenca.

En las gráficas (Figura V.5) de elementos químicos se refleja el cambio de tendencia general de los materiales, observable en los patrones generales de las curvas, los cuales presentan una tendencia con inflexiones muy similares desde la base de la secuencia hasta los 0.5 m de profundidad, sin embargo, a partir de este punto hacia la cima los elementos presentan una dispersión importante, mostrando que elementos químicos afines que por lo general se comportan similar, ya no muestran este comportamiento.

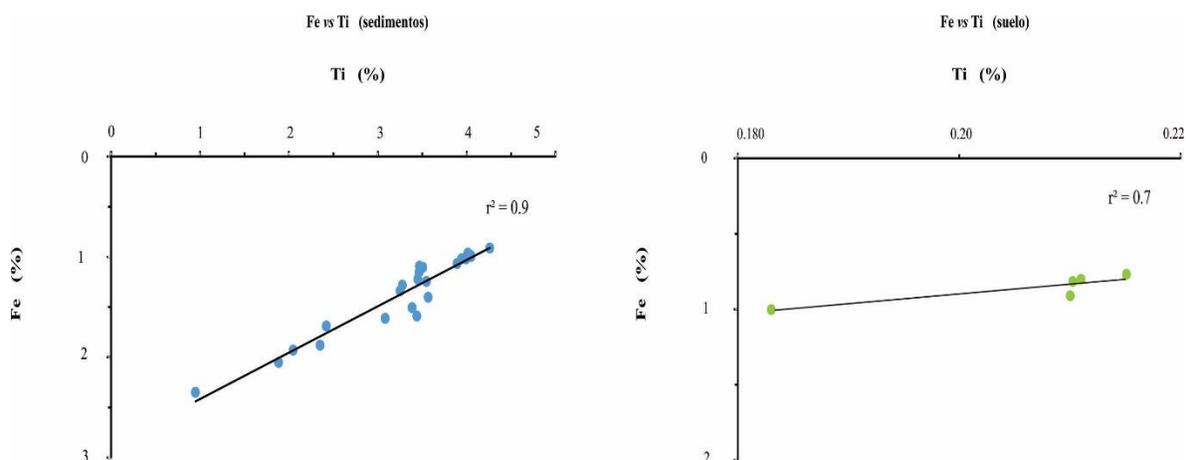


Figura V.5. Se presenta la correlación entre elementos químicos afines donde se observa que para el intervalo de 2.13 – 0.5 m el valor de r^2 es alto en comparación con la parte superior de la secuencia.

Generalmente es en la porción edáfizada donde los procesos de intercambio de agua, aire y nutrientes ocasionan mezcla de los materiales y en este caso, de manera más agresiva, por medio de herramientas de agricultura que ocasionan una mezcla intensa de la parte superior de la secuencia. La parte que se encuentra por debajo de los 0.5 m y que aún presenta la formación de agregados, no ha sido lo suficientemente removilizada como para ocasionar que las propiedades del sedimento pierdan su consistencia original y es por esto que los elementos geoquímicos siguen conservando su afinidad, corroborando que la secuencia no ha sido alterada. Al hacer un análisis de correlación geoquímica de elementos afines (Figura V.4) se puede observar como los materiales entre la base y los 0.5 m de profundidad, muestran un factor de correlación $r^2 = 0.9$, sin embargo, para la parte superior de la secuencia (0.5 – 0 m), el factor de correlación es muy bajo ($r^2 = 0.7$), lo que corrobora lo anteriormente mencionado.

Con lo anterior se puede determinar que la porción útil para realizar una interpretación paleoambiental corresponde de los 2.17 – 0.5 m (ca. 14,141 – 2,464 AP), lo que corresponde con los intervalos de tiempo Pleistoceno tardío, Holoceno temprano, Holoceno medio y parte del Holoceno tardío.

V.IV.II. Indicadores geoquímicos

Para conocer los cambios climáticos y ambientales ocurridos a lo largo del tiempo, en este caso desde el Pleistoceno superior a la actualidad, es de gran utilidad contar con una fuente proveedora de información que nos brinde datos detallados sobre la respuesta/comportamiento de la cuenca bajo distintos escenarios ambientales. Esta fuente son los indicadores geoquímicos, los cuales se describen a continuación separándolos de acuerdo al tiempo de información que nos brinda.

➤ Grupo de los terrígenos (Ti y Fe)

El Ti y el Fe se utilizan como indicadores de la fuente de sedimentos terrígenos (Arnaboldi y Meyers, 2003, Roy *et al.*, 2013; Vázquez *et al.*, 2017). Se observa que el comportamiento del titanio y del hierro a lo largo del tiempo es muy similar (figura V.6). Los

bajos contenidos en estos elementos indican eventos de poca erosión alrededor de la cuenca, los cuales se ligan con la dinámica atmosférica del sitio, es decir, las lluvias producidas por los patrones climáticos, a su vez relacionadas con los patrones de humedad y vientos en la atmósfera, juegan un papel muy importante en el drenaje que acarrea los materiales hacia el lago. El Ti y el Fe han sido relacionados en muchos trabajos (Vázquez *et al.*, 2017) con la susceptibilidad magnética, por lo que ésta al tener mayor cantidad de muestreo por su facilidad de medición, en conjunto con los elementos mencionados nos proporcionan una mayor resolución en la respuesta ambiental a interpretarse.

Con base en lo anterior, se puede interpretar para el intervalo del Pleistoceno superior que cubre nuestra secuencia (ca. 14,141- 11, 622 AP) que el aporte de terrígenos presenta un incremento a lo largo del tiempo, pero con valores relativamente bajos, lo que sugiere un intervalo de condiciones secas pero con incremento de la humedad en el ambiente a lo largo del tiempo. El límite Pleistoceno – Holoceno (11,622 AP) representa un cambio en las condiciones anteriores secas a un intervalo nuevo con predominancia de condiciones de humedad en la región, siendo este un punto que marca el inicio de condiciones nuevas muy distintas para la siguiente etapa.

Durante el Holoceno inferior (11,622 – 8,226 AP) se presentan condiciones de alta cantidad de ingreso de materiales terrígenos, lo que sugiere altas precipitaciones y por tanto un clima húmedo a nivel regional. Durante el Holoceno medio (8,226 – 4,276 AP) se modifican los agentes de erosión, ocasionando un intervalo de tiempo en donde los terrígenos son escasos, dado que el aporte disminuye considerablemente; esto sugiere que las condiciones de humedad fueron escasas y por tanto las sequías fueron dominantes. Finalmente, en el inicio del Holoceno superior (4,276 – 2,464 AP) se presenta un intervalo con un inicio de mayores condiciones de humedad pero que hacia la cima presenta un decremento en la misma; sin embargo, a partir de los 2,464 AP y hasta el momento de la desecación del lago (ca. 1940 DC, ca. 5 años AP), la interpretación paleoclimática no es confiable debido a que los materiales se encuentran mezclados por actividades agrícolas recientes.

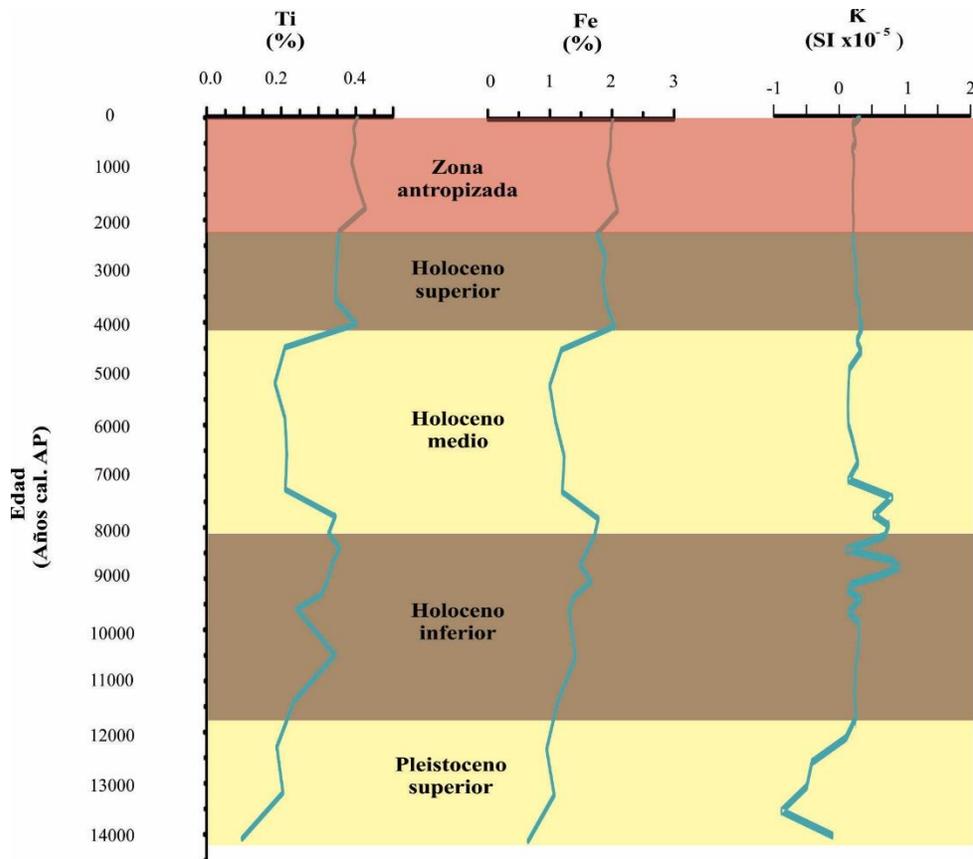


Figura V.6. Correlación de elementos químicos relacionados con el aporte de terrígenos al lago, en combinación con la susceptibilidad magnética (k). Las franjas indican intervalos de tiempo específicos donde la variación de sus propiedades es relativamente constante.

Al realizar una comparación con los datos interpretados para el sitio cercano de SJE (Vázquez *et al.*, 2017), (figura V.7), observamos que la gráfica presenta una resolución distinta y por tanto la aparente correlación no es muy clara, sin embargo, podemos observar en general para el intervalo cubierto en ambas, que en el Holoceno inferior (9,607 – 8,226 AP) en las dos columnas se observa las mismas condiciones de alta humedad lo que indica buena correlación entre ambas. Durante el Holoceno medio (8,226 – 4,276 AP) el intervalo de condiciones secas se presenta en LOB de manera más clara a lo largo de todo el intervalo, mientras que en SJE se observa sólo para el final del intervalo, sugiriendo para SJE mayor erosión posiblemente por encontrarse en la parte media de dos zonas elevadas de la región (una isla y el poblado de San Juanito Escobedo) .

Finalmente en el Holoceno superior (4,276 – 2, 464 AP) ambos tiene una tendencia a condiciones relativamente húmedas, pero predominan las condiciones secas en general. El intervalo superior antropizado en LOB puede interpretarse a partir del registro en SJE donde las condiciones son oscilantes entre seco-húmedo hasta los 600 AP, y se desconoce las características de la parte superior de la secuencia por estar erosionada.

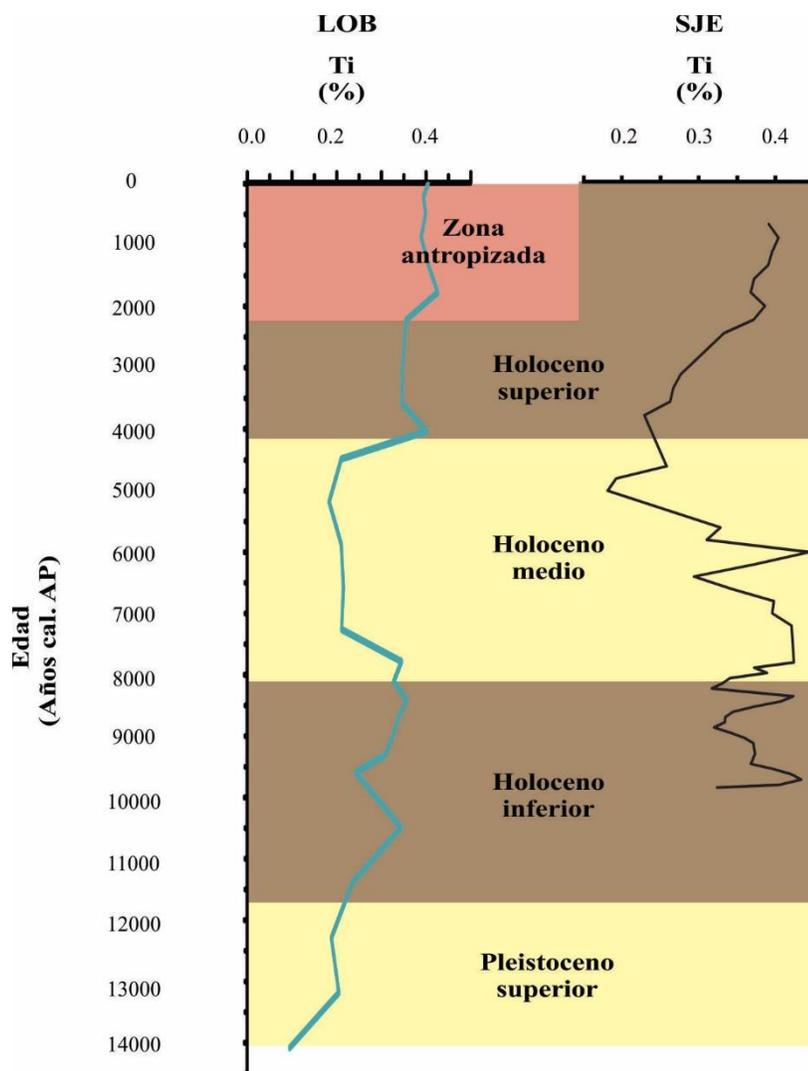


Figura V.7. Comparación del aporte de terrígenos para los dos sitios dentro de la misma cuenca de drenaje (LOB y SJE).

➤ Terrígenos de origen volcánico (K, Al y Si)

Estos elementos se encuentran dentro del grupo de los elementos más abundantes de la corteza terrestre. En el sitio LOB dichos elementos (figura V.8) mantienen un comportamiento muy similar a lo largo del tiempo y parecido a los mencionados en el apartado anterior, motivo por el cual nos hace pensar que el origen de estos es el mismo y los procesos de intemperismo no han afectado en exceso sus concentraciones, por lo que al interpretarse de manera ambiental sugieren las mismas condiciones que los elementos descritos en el apartado anterior.

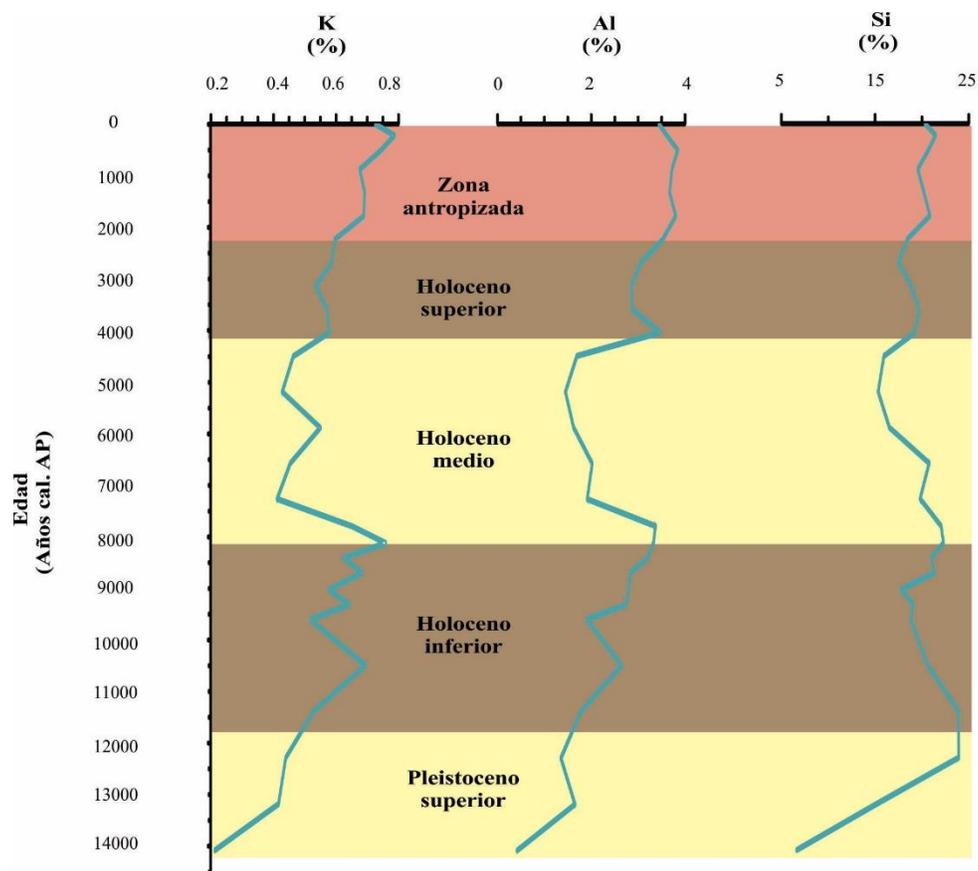


Figura V.8. Dinámica de los elementos semimóviles en la secuencia LOB.

Al comparar la componente de K entre las secuencias LOB y SJE (figura V.9), se aprecian diferentes comportamientos. Podemos ver que en SJE en general los valores son muy bajos, su máximo pico se ubica en el Holoceno superior (8,226 – 4,276 AP), y en LOB su máximo pico se encuentra en el cambio entre el Holoceno temprano y medio. Lo anterior sugiere que el K pudo haberse movilizado en la fase acuosa asociada a procesos de intemperismo distinto, posiblemente debido a que las rocas aledañas a cada uno de los sitios son de diferente composición y por tanto presentan diferentes formas de alteración al estar en contacto con la escorrentía de las laderas en los cerros.

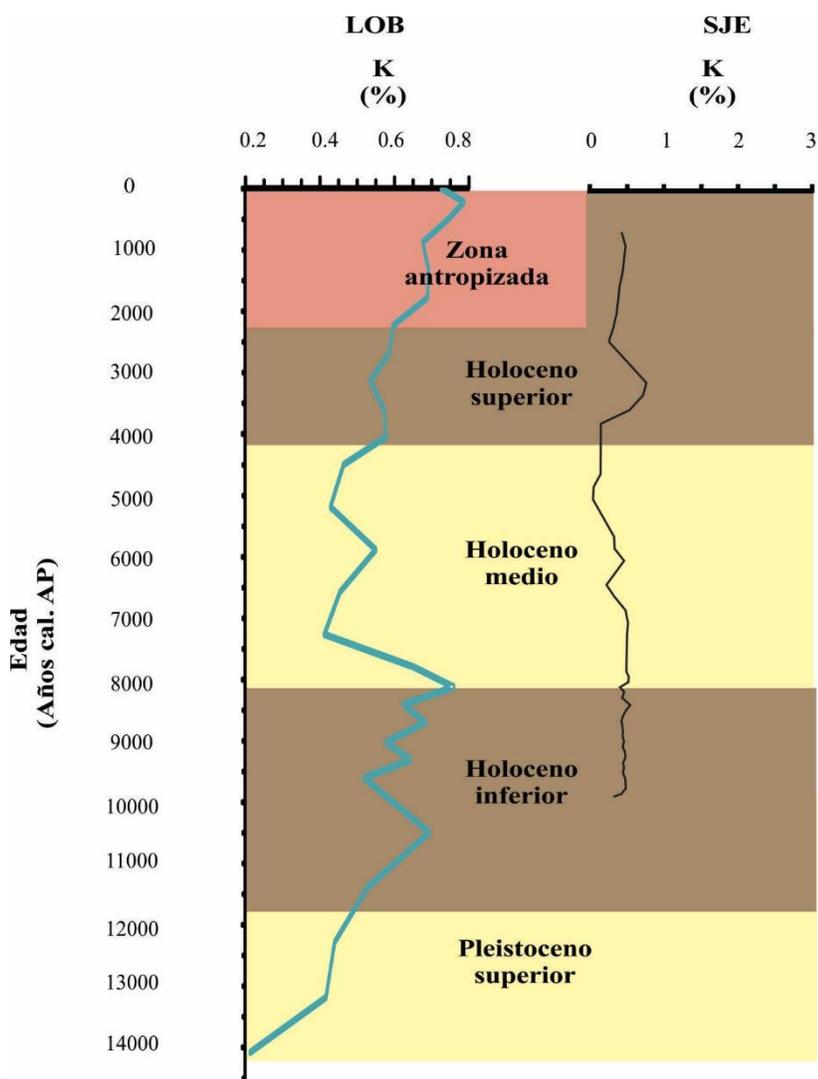


Figura V.9 Comparación del K en los sitios cercanos de SJE y LOB dentro de la cuenca Eatzatlán-Magdalena.

➤ Si/Ti

El cociente Si/Ti ha sido utilizado como indicador del silicio de origen biogénico (Brown *et al.*, 2007, Johnson *et al.*, 2011, Albarrán *et al.*, 2017) ya que elimina la componente de titanio (terrágenos) al realizar su normalización con éste, dejando únicamente la componente biológica (fiura V.10). La concentración de este cociente durante el Pleistoceno superior (14,141 – 11,622 AP) representa los valores más altos de toda la secuencia, esto sugiere que las condiciones de concentración de iones de sílice en el agua permitió la proliferación de organismos con testa de sílice (posiblemente diatomeas o fitolitos). Lo anterior asociado a un intervalo donde el tirante de agua era relativamente bajo como para permitir la saturación de iones de Si en la columna de agua y contribuir a la proliferación de organismos, esto sugiere condiciones relativamente secas en la región. Cabe señalar que se encontraron algunos ejemplares de diatoméas en esta parte de la secuencia, lo que sugiere corrobora la hipótesis de su proliferación aunque no en grandes proporciones.

Durante el Holoceno inferior (11,622 – 8,226 AP) la presencia de diatomeas disminuye considerablemente para presentar los valores más bajos durante el Holoceno medio (8,226 – 4,276 AP) y aumentar ligeramente su presencia durante la parte interpretable del Holoceno superior; esto nos sugiere un cambio en la dinámica lacustre en comparación con el Pleistoceno tardío. Finalmente, en el Holoceno superior antropizado se presenta un aumento en la presencia de sílice biogénico, el cual aunque ya no es paleoambiental, podemos sugerir que se encuentra asociado a la humedad debida al riego constante por actividades agrícolas, lo cual puede propiciar el desarrollo de diatomeas, ya que únicamente es necesaria la presencia de condiciones húmedas para su desarrollo en general, no necesariamente condiciones acuosas.

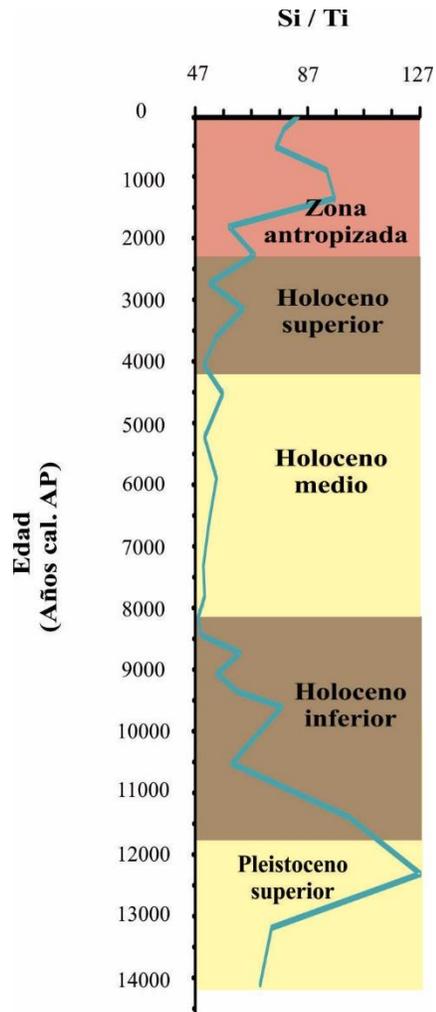


Figura V.10. Producción de biosílice para el sitio LOB en la cuenca Etzatlán Magdalena desde el Pleistoceno superior hasta el Holoceno superior.

➤ **Grupo de los carbonatos (Ca, Sr y Sr/Ti)**

Estos elementos químicos (Ca y Sr) al igual que el cociente Sr/Ti han sido utilizado en diferentes trabajos para indicar precipitación de carbonatos en una cuenca lacustre (Goldberg *et al.*, 2000, Moreno *et al.*, 2007, Kylander *et al.*, 2013). Dado que la litología encontrada en la zona de estudio es totalmente volcánica, se sugiere que los carbonatos presentados en la secuencia no estarían asociados a un proceso de erosión en la cuenca heredado simplemente

de rocas carbonatadas, es decir, ésta precipitación ha ocurrido por la concentración de los elementos químicos procedentes de erosión natural y han precipitado dentro del cuerpo de agua, lo que podría sugerir cambios directamente relacionados con el ambiente. De acuerdo a lo anterior se podría indicar que su presencia estaría relacionada con la evaporación del agua dentro del cuerpo lacustre; en el contexto paleoambiental esto significaría condiciones de sequía. La aridez es sinónimo de sequía, e indica la escasez o ausencia de agua o humedad en el aire y el suelo; es la respuesta a la falta de precipitación (en términos de cantidad, intensidad y regularidad), y alta radiación solar, originando el aumento de la temperatura y valores altos de evapotranspiración superiores a la cantidad de agua disponible (Salinas–Zavala *et al.*, 1998).

Durante el Pleistoceno superior y hasta mediados del Holoceno inferior (14,141 – ca. 10,500 AP) (figura V.11) los indicadores anteriormente mencionados muestran precipitación de carbonatos muy baja, sin embargo, transicionalmente a finales del Holoceno inferior inicia la precipitación de los mismos, para presentar su máximo durante el Holoceno medio e ir disminuyendo paulatinamente durante el inicio del Holoceno tardío. Esto sugiere un cambio transicional a condiciones secas en la cuenca durante el Holoceno inferior para presentar los máximos momentos de aridez durante el Holoceno medio, por lo anterior se sugiere un tirante de agua bajo con alta evaporación y precipitación de carbonatos durante todo el Holoceno medio y por tanto un gran cambio atmosférico y ambiental que provocó un cambio en la dinámica de la cuenca, de condiciones húmedas del Holoceno inferior con un tirante de agua relativamente alto a condiciones más secas.

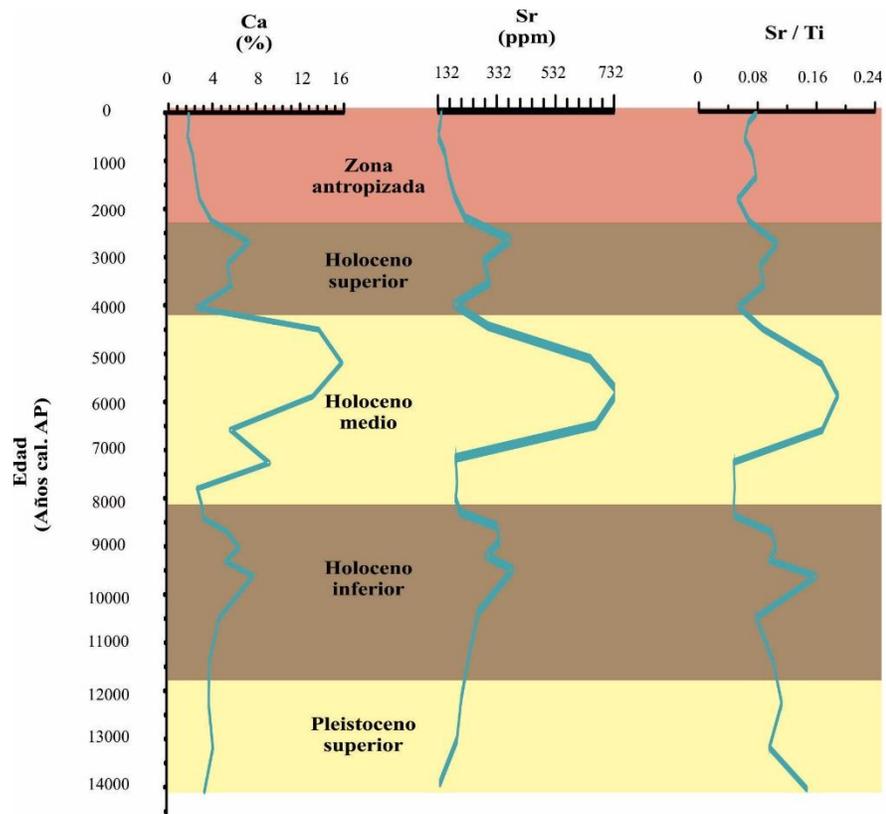


Figura V.11 Indicadores utilizados para interpretar la precipitación de carbonatos en la cuenca de estudio

V.VI. Interpretación paleoambiental y paleoclimática

La historia paleoambiental y paleoclimática de la cuenca Etzatlán-Magdalena se ha determinado mediante proxies geoquímicos, el contenido de materia orgánica y la susceptibilidad magnética (figura V.12), los cuales se encuentran almacenados en el depósito lacustre, mismos que nos proporcionaron una fuente valiosa y abundante de datos. Analizando los eventos en el tiempo se ha identificado una constante evolución en el clima y ambiente.

Pleistoceno superior (14,141 – 11,622 AP)

Durante este período tenemos un ambiente caracterizado por la presencia de sílice de origen biogénico, lo que nos indica aguas concentradas de silicio posiblemente asociadas a un tirante de agua bajo asociado a condiciones de aridez en la cuenca. El Ti indica poco ingreso de terrígenos asociado a bajas precipitaciones en la cuenca lo que argumenta en el mismo sentido. El contenido relativamente alto de materia orgánica sugiere que su aporte podría estar asociado con vegetación dentro del cuerpo lacustre posiblemente pastos asociados a un tirante de agua bajo (vegetación de tipo halófila); lo anterior sugiere un ambiente seco asociado a la deglaciación del UMG, pero no tan seco como para permitir la evaporación del agua y por tanto tener precipitación de carbonatos. La transición entre el Pleistoceno tardío y el Holoceno temprano, conocido como el Younger Dryas, no presenta un aparente cambio drástico en los patrones geoquímicos analizados.

Holoceno inferior (11,622 AP – 8,226 AP)

En este intervalo el planeta se encontraba en la transición de una época fría y seca a otra más húmeda donde los cambios en la temperatura y la humedad fueron muy importantes. El Ti indica altas precipitaciones y por tanto humedad importante durante este intervalo, a diferencia del período anterior donde las precipitaciones eran escasas. Este cambio de clima se refleja en el contenido relativamente alto de materia orgánica, lo que sugiere que la vegetación es más continental y parte de esta es acarreada por las altas escorrentías. Al final del período la vegetación no se extingue, pero su producción se ve modificada considerablemente, marcando la transición a las condiciones completamente distintas del Holoceno medio. Transicionalmente hacia la cima del período existe también la precipitación

de carbonatos que paulatinamente va aumentando hasta llegar al Holoceno medio, en este mismo tiempo la materia orgánica presenta los menores valores de concentración, argumentando en el mismo sentido. Estas condiciones señalan una etapa conocida como período posglacial.

Holoceno medio (8,226 – 4,276 AP)

Este periodo presenta un cambio en la precipitación de carbonatos de manera considerable, ya que se observan los valores más elevados de toda la secuencia lo que sugiere un periodo de sequía extenso, lo anterior se correlaciona con el contenido de Ti que sugiere bajas precipitaciones, contrastando con los valores de toda la secuencia. La MO resulta un tanto contradictoria ya que muestra valores altos, lo que sugiere que había desarrollo de vegetación, pero posiblemente dentro del cuerpo de agua, que aunque había condiciones secas, existía un tirante de agua bajo lo que pudo haber permitido el desarrollo de pastos dentro del agua. Lo anterior sugiere una cuenca evaporativa con bajo tirante de agua; el comportamiento de estos indicadores nos sugiere que hubo un fuerte cambio en la dinámica de la atmósfera y del ambiente; y justo en esta etapa se desarrolló el evento llamado “Óptimo Climático del Holoceno” que posiblemente esté relacionado con lo observado en este trabajo.

Holoceno superior (4,276 – 2,464 AP)

Durante la transición del Holoceno medio al superior, la aridez fue disminuyendo transicionalmente y aumentó la entrada de terrígenos, por tanto, las precipitaciones en la cuenca. Sin embargo, los datos presentan oscilaciones que posiblemente indican intercalación entre condiciones secas y húmedas en la cuenca de manera cíclica, situación que se manifiesta en la pérdida y ganancia de MO en la secuencia, argumentando en el mismo sentido. Lo anterior posiblemente está relacionado con los efectos producidos por el fenómeno del Niño, que han provocado intercalación de condiciones secas y húmedas principalmente durante el Holoceno tardío (Vázquez et al., 2017) de acuerdo a lo sugerido por diferentes registros en el planeta (Moy et al., 2002 y Conroy et al., 2008).

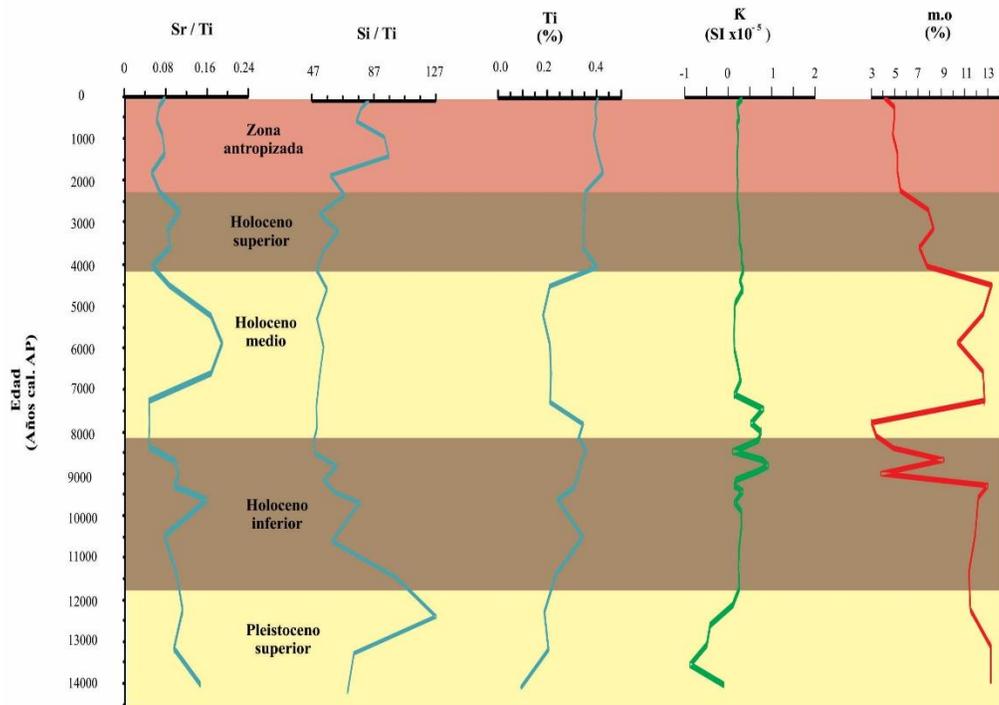


Figura V.12. Se muestran las relaciones geoquímicas, la susceptibilidad magnética y el contenido de materia orgánica, los cuales en conjunto nos ayudan a conocer climas y ambientes del pasado.

VI. CONCLUSIONES

Caracterización de sedimentos

- Mediante la caracterización y análisis de tres trincheras (LOB III, LOB II y LOB I), se pudo obtener una secuencia maestra de 2.17 m de longitud con características óptimas para poder realizar el presente trabajo.
- A partir del análisis textural se pudo determinar la presencia mayoritaria de arcillas y limos, y escasas arenas, con lo que además se determinaron diez unidades litoestratigráficas en la columna maestra. Lo anterior permitió tener información sobre la dinámica erosiva en la cuenca y sus características para almacenar y conservar material sedimentario.
- Los sedimentos analizados presentan una porción en la parte superior que se encuentra influenciada por procesos pedogenéticos, que no fue utilizada para interpretaciones paleoambientales y paleoclimáticas debido a que se encuentran en constante removilización por intervención antrópica, sin embargo, nos permitió compara geoquímicamente un material antropizado y uno natural.
- Por medio de un fechamiento por ^{14}C se pudo determinar la edad de la base de la secuencia y mediante la correlación estratigráfica entre registros geofísicos de este sitio y de un estudio previo en la cuenca, se pudo correlacionar los fechamientos y afinar el modelo de edades y tasas de sedimentación con cinco fechamientos por ^{14}C .
- Al realizar la correlación entre ambas secuencias se pudo tener una secuencia que abarca un mayor período de tiempo que los estudios previos.

Caracterización magnética y geoquímica

- La susceptibilidad magnética fue de gran utilidad para correlacionar trincheras y obtener una secuencia maestra representativa de la zona de estudio. Por otro lado, la misma técnica permitió la correlación de la secuencia maestra y el estudio previo realizado en la cuenca de estudio.
- La susceptibilidad magnética en conjunto con el Ti, nos han permitido tener información sobre el aporte de terrígenos a la cuenca y hacer interpretaciones relacionadas con la escorrentía en la cuenca de drenaje.

- Los elementos geoquímicos obtenidos por la técnica de FRX en combinación con cocientes entre ellos, nos ha permitido lograr una interpretación paleoambiental y paleoclimática de la zona de estudio. La determinación de la materia orgánica nos ha permitido hacer interpretaciones relacionadas con la posible presencia de vegetación dentro o fuera del cuerpo lacustre, la cual se puede encontrar asociada en algunas ocasiones a la humedad producida por lluvias y otras puede estar asociada al cuerpo de agua lacustre a pesar de haber condiciones poco favorables en la parte externa y dependiendo de las características del ambiente habrá una respuesta en cada caso.

Caracterización ambiental y climática

- Con base en los distintos proxies analizados se sugiere que las condiciones ambientales para el fin del Pleistoceno superior (14,141 – 11,622 AP) el clima fue árido pero no lo suficientemente seco como para dejar sin agua el lago; para el Holoceno inferior (11,622 AP – 8,226 AP) las condiciones ambientales fueron húmedas y se infiere un tirante de agua elevado; estas condiciones cambiaron drásticamente para el Holoceno medio (8,226 – 4,276 AP) con un extenso período de precipitación de carbonatos que sugiere un clima extremadamente seco, y finalmente durante el Holoceno superior (4,276 – 0 AP) los datos presentan oscilaciones que posiblemente indican intercalación de condiciones secas y húmedas de menor duración en la cuenca de estudio.
- La materia orgánica dentro del cuerpo de agua pasó por muchos cambios climáticos pero su capacidad de resiliencia fue mayor a la extinción de la misma, en este trabajo se pudo constatar que la lluvia puede afectar o proveer vida y que dependiendo de las necesidades de cada organismo será la respuesta.
- Realizar este estudio nos ha brindado el conocimiento para reafirmar que el planeta Tierra ha permanecido en constante cambio climático, que este ha sido provocado por agentes naturales como cambios en los patrones del viento y cambios en la temperatura y precipitación, entre muchos otros y que estos cambios traerán modificaciones en el ambiente ya sea a nivel local o regional. Entender estos factores es fundamental para los tiempos modernos puesto que los medios de comunicación y

los discursos políticos nos hablan del cambio climático y este siempre ha existido, la única diferencia es que las actividades humanas han repercutido en el tiempo natural en el que ocurren los cambios en el planeta.

- Llevar a cabo estudios paleoclimáticos en México es muy importante ya que nuestro país es multi-diverso en climas y conocer como han cambiado nos permite comprender como serán las posibles condiciones climáticas en el futuro.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara I., Velázquez D., Lozano M., Bischoff J., Domínguez G. y Garduño V., 2010, ***“Evolución Paleolimnológica del Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno”***, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 62, pp. 345-357.
- Albarrán M., Reyes I. y Ortega B., 20017, ***“Propiedades magnéticas de sedimentos del lago de Xochimilco”***, Latinmag Letters, Vol. 7, pp. 1-7.
- Álvarez M., 1961, ***“Provincias fisiográficas de la República Mexicana”***, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 24, pp. 3-20.
- Arnaboldi M. y Meyers P., 2003, ***“Geochemical evidence for paleoclimatic variations during deposition of two Late Pliocene sapropels from the Vrica section, Calabria”***, Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, Vol. 190, pp. 257-271.
- Berger W., 1990, ***“The younger dryas cold spell-a quest for causes”***, Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, Vol. 89, pp. 219-237.
- Bernal P., Beramendi E., Lugo C. y Daesslé, W., 2010, ***“Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario”***, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 62, pp. 305-323.
- Bernal J. y Roy P., 2010, ***“Prefacio”***, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 62, pp. I-II.
- Brown E., Johnson T., Scholz C., Cohen A. y King J., 2007, ***“Abrupt change in tropical African climate linked to the bipolar seesaw over the past 55,000 years”***, Geophysical Research Letters, Vol. 34, pp. 1-5.
- Butler R., 1998, ***“Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes”***, Edición electrónica, Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona, EEUU.
- Caballero M., Lozano S., Vázquez L. y Ortega B., 2010, ***“Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial”***, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 62, pp. 359-377.

- Carenas M., Giner J., González J. y Pozo M., 2014, ***“Geología”***, Edición electrónica, Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid, España.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2015, ***“Atlas del agua en México”***, <http://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf> (Consultado el 9 de septiembre de 2017).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2009, ***“Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Altos de Jalisco (143), estado de Jalisco”***, en: Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Altos de Jalisco (1413), Estado de Jalisco. Diario Oficial de la Federación 17 de agosto de 2017.
- Conroy J., Overpeck J., Cole E., Shanahan T. y Steinitz M., 2008, ***“Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record”***, Quaternary Science Reviews, Vol. 27, pp. 11-12.
- Clark A., 1997, ***“Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys”***, AGSO: Journal of Australian Geology and Geophysics, Vol. 17, pp. 83-104.
- Da Silva A., De Vleeschouwer D., Boulvain F., Claeys P., Fagel N., Humblet M. y Dekkers M., 2013, ***“Magnetic susceptibility as a high-resolution correlation tool and as a climatic proxy in Paleozoic rocks—merits and pitfalls: examples from the Devonian in Belgium”***, Marine and Petroleum Geology, Vol. 46, pp.173-189.
- Ferrari L., 2000, ***“Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década”***, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 53, pp. 84-92.
- Frey H. y Lange R., 2011, ***“Phenocryst complexity in andesites and dacites from the Tequila volcanic field, Mexico: Resolving the effects of degassing vs. magma mixing”***, Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 162, pp. 415-445.
- Folk R., 1980, ***“Petrology of sedimentary rocks”***, Edición electrónica, Universidad de Texas, EEUU.

- García E., 1973, "***Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen (Adaptado para las condiciones de la República Mexicana)***", 5ta. Edición, Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Gaudette H., Flight W., Toner L. y Folger D., 1974, "***An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments***", Journal of Sedimentary Research, Vol. 44, pp. 249-253.
- Goladen E., Phedorin M., Grachev M., Bobrov V., Dolbnya I., Khlystov O. y Ziborova G., 2000, "***Geochemical signals of orbital forcing in the records of paleoclimates found in the sediments of Lake Baikal***", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 448, pp. 384-393.
- Gómez A., Orozco M y Ferrari L., 2005, "***Petrogénesis ígnea de la faja volcánica transmexicana***", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 57, pp. 227-283.
- Hans J., 1961, "***Derivation of state factor equations of soil and ecosystems***", Soil Science Society of America, Vol. 25, pp. 385-388.
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo municipal), 2017a, "***Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Jalisco. San Juanito de Escobedo***", <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM14jalisco/municipios/14007a.html> (Consultado el 17 de agosto de 2017).
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo municipal), 2017b, "***Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Jalisco. Magdalena***", <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM14jalisco/municipios/14055a.html> (Consultado el 17 de agosto de 2017).

INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo municipal), 2017c, ***“Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Jalisco. Etzatlán”***,

<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM14jalisco/municipios/14036a.html> (Consultado el 17 de agosto de 2017).

INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo municipal), 2017d,

“Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Jalisco. Ahualulco del mercado”,

<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM14jalisco/municipios/14003a.html> (Consultado el 17 de agosto de 2017).

INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo municipal), 2017e,

“Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Jalisco. Teuchtitlán”,

<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM14jalisco/municipios/14095a.html> (Consultado el 17 de agosto de 2017).

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2000, ***“Estudio hidrológico del estado de Jalisco”***,

http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221751/702825221751_1.pdf (Consultado el 9 de septiembre de 2017).

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2009, ***“Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. San Juanito de Escobedo Jalisco”***,

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datosgeograficos/14/14007.pdf> (Consultado el 9 de septiembre de 2017).

IUSS (International Union of Soil Sciences), 2007, ***“Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos”***, en: FAO (Ed), Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, Roma.

- Johnson T., Brown E. y Shi J., 2011, "***Biogenic silica deposition in Lake Malawi, East Africa over the past 150,000 years***", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 303, pp. 103-109.
- Kylander M., Klaminder J., Wohlfarth B. y Löwemark L., 2013, "***Geochemical responses to paleoclimatic changes in southern Sweden since the late glacial: the Hässeldala Port lake sediment record***", *Journal of paleolimnology*, Vol. 50, pp.57-70.
- Lindsley D., Andreasen G. y Balsley J., 1966, "***Magnetic properties of rocks and minerals***", en: Geological Society of America (Ed). *Handbook of physical constants*.
- Lozano M., Roy P., Correa Y., Caballero M., Carriquiry J., Figueroa B., Islebe G., González L. y Díaz J., 2015, "***Registros paleoclimáticos***", García C. y Rueda J (Ed), *Reporte Mexicano de Cambio Climático*, Ciudad de México, pp. 113-130.
- Lowrie W., 2007, "***Fundamentals of geophysics***", Edición electrónica, Universidad Cambridge, Inglaterra.
- Lugo J. y Córdova C., 1992, "***Regionalización geomorfológica de la república mexicana***", *Investigaciones geográficas*, Vol. 25, pp. 25-63.
- Martínez M. y Mendoza C., 2016, "***Acoplamiento sismogénico en la zona de subducción de Michoacán – Colima – Jalisco - México***", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 68, pp. 199-214.
- Magaña V., Pérez J., Conde C., Gay C. y Medina S., 1997, "***El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) y sus impactos en México***", Departamento de Meteorología General Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Reporte INE-Oct, 97.
- Metcalf S., Jones M., Davies S., Noren A. y Mackenzie A., 2010, "***Climate variability over the last two millennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de Juanacatlán, Mexico***", *The Holocene*, Vol. 20, pp. 1195-1206.
- Meyers P. y Lallier E., 1999, "***Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates***", *Journal of Paleolimnology*, Vol. 21, pp. 345–372.

- Munsell Color, 2009, "***Munsell soil color book with genuine Munsell color chips***".
- Mizutani U., 2001, "***Introduction to the electron theory of metals***", Edición electrónica, Universidad Cambridge, Inglaterra.
- Monroe J., Wicander R. y Pozo M., 2008, "***Geología. Dinámica y evolución de la Tierra***", Edición electrónica, España.
- Moreno A., Giralt S., Valero G., Sález A., Bao R. Preggo R., Pueyo J., González S. y Taberner C., 2007, "***A 14kyr record on the tropical Andes: The Chungará sequence (18° S, northern Chilean Altiplano)***", Quaternary International, Vol. 161, pp. 4-21.
- Moy C., Seltzer G., Rodbell D. y Anderson D., 2002, "***Gulf of California sea Surface temperatures and the North American monsoon: mechanistic implications from observatios***", Nature, Vol. 420, pp. 162-165.
- Myrow P., 1978, "***Colors of sedimentary rocks***", en: Encyclopedia of Earth Science, Springer (Ed). Dordrecht., pp. 251-253.
- NRC (National Research Council), 2001, "***Climate change science: An analysis of some key questions***", National Academies Press.
- Rollinson R., 1993, "***Using Geochemical Data: Evolution, Presentation, Interpretation***", Longman Scientific and Technical (Ed).
- Ruiz V., 2003, "***Estudio paleomagnético del cinturón volcánico transmexicano: implicaciones tectónicas***", Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid.
- Salinas C., Lluch D., Hernández S. y Lluch D., 1998, "***La aridez en el noreste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal***", Atmósfera, Vol. 11, pp. 29-44.
- Schaaf P., Stimac J., Siebe C. y Macías., J, 2005, "***Geochemical evidence for mantle origin and crustal processes in volcanic rocks from Popocatépetl and surrounding monogenetic volcanoes, central Mexico***", Journal of Petrology, Vol. 46, pp.1243-1282.

- Siebe C., Abrams, M. y Macías, J., 1995, ***“Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del actual como del volcán Popocatepetl”***, en: Comité Científico Asesor CENAPRED-UNAM (Ed), Volcán Popocatepetl estudios realizados durante la crisis de 1994-1995, Ciudad de México., pp. 195-220.
- Siebe C., Jahn R. y Stahr K., 2006, ***“Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo”***.
- Soler A., 2006, ***“Investigaciones Arqueomagnéticas en México. Fundamentos, Historia y Futuro”***, Monografías del Instituto de Geofísica – UNAM, Num. 10, pp. 5-88.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2001, ***“Carta Geológico-Minera Etzatlán F13-D53, escala 1: 50, 000”***.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2012, ***“Inventario físico de los recursos minerales de la carta Etzatlán F13-D53. Municipios: San Marcos, Etzatlán, San Juanito de Escobedo, Magdalena y Hostotipaquillo, en el estado de Jalisco, e Ixtlán del Río y Amatlán de Cañas, estado de Nayarit”***, https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T1412BUGJ0001_01.PDF. (Consultado el 12 de septiembre de 2017).
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional), 2017, ***“Estación meteorológica ANTONIO ESCOBEDO (DGE, periodo 1981-2010)”***, <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=jal> (Consultado el 11 de septiembre de 2017).
- Roy P., Rivero A., López N., Pérez L., Metcalfe S., Sankar G. y Sánchez J., 2013, ***“A record of Holocene summer-season palaeohydrological changes from the southern margin of Chihuahua Desert (Mexico) and posible forcings”***, The Holocene, Vol. 23, pp. 1105-1114.
- Tipler A. y Mosca G., 2003, ***“Física para ciencia y tecnología”***. Reverte (Ed), Barcelona.
- Tucker M., 2003, ***“Sedimentary rocks in the field: A practical guide”***.

Vázquez G., Roy P., Solis B., Blanco E. y Lozano R., 2012, "***Holocene paleohydrology of the Etzatlán-Magdalena basin in western-central Mexico and evaluation of main atmospheric forcings***", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, Vol. 487, pp. 149-157.

Wallace P. y Carmichael I., 1994, "***Petrology of Volcán Tequila, Jalisco, Mexico: disequilibrium phenocryst assemblages and evolution of the subvolcanic magma system***", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 117, pp. 345-361.