



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES**

**UNIDAD MORELIA**

# **Paleomagnetismo y Paleoclima del Lago Chapala, Jal., México**

## **TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADA EN GEOCIENCIAS**

**PRESENTA:**

**EVA PÉREZ IZAZAGA**

TUTOR DE TESIS: Juan Julio Morales Contreras

CO-TUTOR: Gabriel Vázquez Castro

MORELIA, MICHOACÁN

Marzo 2018



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

**LIC. 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 12** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **30 de octubre del 2017**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Eva Pérez Izazaga** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **413085179**, con el trabajo titulado: "Paleomagnetismo y Paleoclima del lago Chapala, Jal., México", bajo la dirección como **tutor** del Dr. Juan Julio Morales Contreras y como **co-tutor** al Dr. Gabriel Vázquez Castro.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

**Presidente:** Dr. José Guadalupe Rosas Elguera  
**Vocal:** Dr. Pedro Zárate Del Valle  
**Secretario:** Dr. Juan Julio Morales Contreras  
**Suplente:** Dr. Gabriel Vázquez Castro  
**Suplente:** Dra. Cynthia Armendáriz Arnez

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Morelia, Michoacán a, 13 de febrero del 2018.



**DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ**  
SECRETARIO GENERAL

**CAMPUS MORELIA**

Apartado Postal 27-3 (Santa Ma. De Guido), 58090, Morelia, Michoacán  
Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3502 y (55)56.23.73.02, Extensión Red UNAM: 80503  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

## **Agradecimientos**

Agradezco el apoyo económico brindado por CONACYT a través del proyecto de investigación de CHAPHOLO No. CB2011-168685 dirigido por Pedro Zarate del Valle, para el cual se conformó desde 2012 un equipo de trabajo internacional, interdisciplinario e interinstitucional entre las universidades: (UDG, UNAM, UMSNH, U Kiel, Alemania).

Agradezco el apoyo financiero para la investigación brindado por el Dr. Avto Gogichaisvili a través del proyecto DGAPA-PAPIIT IN113517.

Quiero agradecer a la UNAM, la ENES Morelia y al Instituto de Geofísica por ser mi segundo hogar desde hace más de cuatro años.

A mis papás: Olga y Romualdo, porque todos mis logros son y serán gracias a ustedes, porque siempre me apoyan a su manera, pero lo hacen, gracias.

A mis hermanos: Gis, Carmen, Olga, Luisa, Roci, Nena, Ruma, Lilí y Kari, porque cada uno de ustedes me enseñan cosas nuevas cada día, a Gis cosas de la vida que jamás podría aprender yo solita. Los quiero muchos y gracias por su apoyo.

A mis asesores y sinodales: Dr. Juan Julio Morales, Dr. Gabriel Vázquez Castro, Dra. Cynthia Armendáriz, Dr. Pedro Zárate del Valle y Dr. José Rosas Elguera, gracias por sus revisiones y comentarios.

Especial agradecimiento a Magdalena Velázquez-Bucio quien me apoyo de manera incondicional en la identificación e interpretación de las Diatomeas. Ella quien con su paciencia infinita me enseñó todo lo que ahora sé sobre Diatomeas, Gracias.

De igual manera agradezco infinitamente a la Dr. Isabel Israde-Alcántara quien me permitio usar el microscopio con cámara digital, gracias a esto pude obtener las fotografías de las diatomeas, gracias por compartir su tiempo y conocimiento conmigo.

A mis profesores que me enseñaron un abanico infinito de conocimientos: Ernesto, Sol, Colosi, Miguel, Lupita, Alicia, Diana, Neftalí, Manuel Mendoza, Víctor Manuel, Víctor Hugo Garduño, Sam, Luis Antonio, Mario, todos hicieron posible mi formación académica actual e igual no sé todo, pero tengo idea de todo, gracias.

Agradezco a la Dra. Sol, nuestra mamá de todos los “Geos”, siempre está ahí para quienes la ocupamos dispuesta a dar su mejor consejo y hacer que veas las cosas de diferentes ángulos para encontrar de manera más fácil la mejor solución posible. Gracias por darme razones suficientes para no dejar la universidad cuando simplemente por comodidad la hubiese dejado, por motivarme a seguir, por creer en mí y seguir creyendo en mí. Está por demás decir que las palabras no alcanzan para agradecerte.

A Nef que siempre tiene disponible el laboratorio para hacer nuestros experimentos (Yo con el procesamiento de las diatomeas). Gracias Nef.

A mis compañeros: Dani, Poncho, Luz, Vane, Luis, Erick, Anyelo, Bob, Liz, Homero, Jorge... Por aguantarme todos estos años de carrera, fue un placer convivir con ustedes.

A mis mejores amigos de parrandas: Luz, Naye, Dani, Ángel, gracias por soportar mis malos chistes, mi sarcasmo al hablar y mis quejas del mundo que últimamente son muchas. Los quiero.

A Isra que escucha cada una de mis ideas por más chiflada que este. Gracias.

## DEDICATORIA



### **A mi Hijo**

Ivan Alexis mi mejor título universitario, aunque hiciste que las cosas fuesen más despacio, eres mi motor y sé que puedo hacer cualquier cosa que me proponga gracias a ti. Te amo y te amaré por siempre.

# Contenido

Resumen.....	1
Abstract .....	2
<b>Capítulo I</b> .....	<b>3</b>
1.1 Introducción .....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Planteamiento del problema .....	5
1.4 Objetivos .....	5
1.5 Antecedentes .....	6
<b>Capítulo II Bases teóricas</b> .....	<b>8</b>
2.1 Historia del Lago de Chapala .....	8
2.2 Características del lago de Chapala.....	8
2.3 Historia del Magnetismo .....	9
2.4 Variaciones del campo magnético.....	10
2.4.1 Variación secular.....	10
2.5 Origen del Campo Magnético Terrestre.....	12
2.6.1 Campo magnético.....	13
2.6.2 Momento magnético.....	14
2.6.3 Flujo del campo magnético .....	14
2.6.4 Energía Magnética.....	15
2.6.5 Magnetización y susceptibilidad magnética.....	16
2.6.6 Componentes del Campo Magnético Terrestre .....	16
2.6.7 Temperatura de Curie.....	17
2.7 Tipo de Materiales.....	18
2.7.1 Diamagnetismo .....	18
2.7.2 Paramagnetismo .....	20
2.7.3 Ferromagnetismo.....	21
2.7.4 Antiferromagnetismo .....	22
2.7.5 Ferrimagnetismo .....	22
2.8 Dominios ferromagnéticos .....	23
2.9 Minerales magnéticos.....	25
2.10 Ciclos de Histéresis magnética.....	27

2.11 Paleomagnetismo .....	28
2.12 Tipos de Magnetización .....	29
2.12.2 Magnetización Remanente Detrítica .....	30
2.13 Magnetismo ambiental .....	31
2.14 Diatomeas como indicadores de cambios ambientales en Lagos .....	32
2.14.1 Formas de las Diatomeas.....	32
Capítulo III Generalidades .....	34
3.1 Ubicación y vías de acceso.....	34
3.2 Fisiografía .....	35
3.2.1 Sub-provincia Chapala .....	36
3.3 Hidrografía .....	36
3.4 Sub-cuenca Chapala .....	38
3.5 Clima .....	39
3.6 Geología Regional.....	41
3.6.1 Geología Local .....	42
3.6.2 Estratigrafía del área.....	42
Capítulo IV Metodología .....	45
4.1 Trabajo de campo .....	45
4.2 Trabajo de laboratorio .....	46
4.3 Muestreo y medición de propiedades magnéticas .....	46
4.3.1 Susceptibilidad magnética.....	46
4.3.2 Magnetización Remanente Natural .....	48
4.3.3 Adquisición de Magnetización Remanente Anhistórica .....	49
4.3.4 Magnetización remanente isothermal.....	50
4.3.5 Desmagnetización por campos alternos .....	51
4.3.6 Ciclo de Histéresis.....	52
4.3.7 Determinación de tasa de sedimentación y variaciones del campo magnético .....	52
4.4 Observaciones al microscopio.....	53
4.4.1 Procesamiento de Diatomeas .....	53
4.4.2 Identificación de Diatomeas.....	54
Capítulo V Resultados.....	55
5.1 Resultados magnéticos .....	55

5.1.1	Parámetros dependientes de la concentración .....	55
5.1.2	Susceptibilidad magnética.....	55
5.2.3	Ciclo de histéresis y curvas termomagnéticas continuas asociadas .....	59
5.3	Propiedades de remanencia .....	62
5.3.1	Desmagnetización por campos alternos .....	62
5.4	Tasa de sedimentación .....	66
5.6	Correlación de parámetros magnéticos-Diatomeas .....	76
5.6.2	Parámetros magnéticos dependientes del tamaño de grano con el contenido de las diatomeas	80
Capítulo VI.....		82
6.1	Discusión.....	82
6.2	Conclusiones .....	84
Referencias.....		85

## Resumen

Los cuerpos lacustres son una fuente importante de información magnética y paleoclimática ya que registran de manera continua los cambios que ocurren dentro del lago, así como a su alrededor –cuenca–.

Se realizó el estudio de un núcleo sedimentario de ca. 10,000 años de antigüedad, con una profundidad de 27.15 m, analizado por técnicas clásicas de magnetismo de rocas e identificación de diatomeas, con el objetivo de determinar la evolución magnética y climática en el Lago de Chapala usando diferentes parámetros; es una tesis de tipo multiproxy, que se apoya en el magnetismo de rocas y diatomeas, para determinar su evolución magnética-ambiental en el Holoceno reciente.

Las variaciones direccionales de la magnetización remanente confirman que los sedimentos lacustres del Lago de Chapala poseen una magnetización detrítica, a partir de la cual se investigaron las variaciones experimentadas por el campo geomagnético.

Por medio de la inclinación y declinación magnética obtenidas en el laboratorio, se determinó una tasa de sedimentación que va de 1.5 mm/año a 3mm/año, mostrando gran variabilidad tanto en la concentración de la mineralogía magnética, la mineralogía, la granulometría, evidenciando un lago dinámico a través del tiempo que va desde un lago profundo con turbidez, hasta un lago relativamente profundo con aumento en la salinidad, con diferentes frecuencias e intensidades de las lluvias hecho sustentado con la presencia de diatomeas de tipo bentónicas y planctónicas, tales como *A. granulata*, *S. nemanensis*, *S. minutulos*.

El aporte principal de este trabajo radica en que no existen estudios de este tipo en el lago de Chapala que aborden el tema del magnetismo ambiental de manera continua registrado en los sedimentos, ni correlación de las propiedades magnéticas con el contenido de diatomeas, siendo de gran importancia ya que es el lago más grande de México. Aún quedan muchas incógnitas por resolver, quedando abiertas para estudios futuros.

## Abstract

Lacustrine bodies are an important source of magnetic and paleoclimatic information since they continuously record the changes that take place within a lake, as well as from its surroundings –basin.

A rock-magnetic and diatom identification study of a sedimentary core of *ca.* 10,000 years old, with a depth of 27.15 m, was carried out with the aim of determining the magnetic and climatic evolution in Lake Chapala using different parameters; It is a multiproxy-type thesis, supported on rock-magnetism and diatoms, to determine its environmental magnetic evolution in the recent Holocene.

The directional variation of the natural remanent magnetization confirms that the lacustrine sediments of Lake Chapala possess a detritic magnetization, from which the variations experienced by the geomagnetic field were investigated.

By means of the magnetic inclination and declination determined in the laboratory, a sedimentation rate between 1.5 mm/year and 3 mm/year was determined, showing a great variability in the concentration of the magnetic mineralogy and granulometry, evidencing a dynamic lake through time that goes from a deep turbid-lake to a relatively deep lake with an increase in salinity, with different frequencies and intensities of the rainfall, based on the presence of benthic and planktonic diatoms, like *a. granulata*, *s. nemanensis* and *s. minutules*.

The main contribution of this work is that no studies of this type have been carried out previously in Lake Chapala that address the subject of environmental magnetism continuously recorded in sediments, nor correlation of magnetic properties with the content of diatoms, being the largest lake in Mexico. There are still many unknowns to solve, remaining open for future studies.

# Capítulo I

## 1.1 Introducción

El campo magnético terrestre (CMT) varía con respecto al tiempo. Esto se sabe debido a que algunos minerales tienen una memoria magnética –como la magnetita y titanomagnetita–, por tanto, quedan magnetizados con un valor diferente al de la magnetización que existe actualmente. Gracias a esto se sabe que el paleomagnetismo es de gran utilidad para reconstruir procesos como la tectónica de placas y, recientemente, los procesos ambientales.

Las partículas -sedimento- que son depositadas posteriormente en los lagos son un reflejo del medio que los rodea, generando un archivo de manera continua de parámetros físicos, químicos, magnéticos, biológicos etc. Por ello es muy importante el estudio de los sedimentos, ya que gracias a ellos se obtiene información continua o semicontinua del ambiente prevaleciente durante su deposición.

Los sedimentos están constituidos por un conjunto de granos, minerales de todo tipo: diamagnéticos, ferromagnéticos, paramagnéticos. Mediante la determinación de los parámetros magnéticos es posible identificar estos minerales para poder obtener características específicas de cómo ha variado la concentración, el tamaño de grano o la mineralogía, para con ello obtener una idea de cómo era el ambiente al momento de su depósito –paleo ambiente–.

Los minerales ferromagnéticos son capaces de registrar variaciones de las componentes del CMT al momento de depositarse. También son capaces de registrar cambios climáticos que suceden dentro del cuerpo de agua y de su entorno de captación.

Los restos de algas que vivieron dentro del lago nos permiten inferir condiciones bajo las cuales vivieron. Estas algas, específicamente las diatomeas, también nos pueden indicar la evolución ambiental a lo largo del tiempo.

Si bien la mayoría de los cambios registrados en el depósito de los sedimentos son debidos a cambios graduales del entorno a través del tiempo, también se registran perturbaciones relativamente rápidas, como eventos volcánicos o meteorológicos (Martínez-Abarca, 2017),

quedando registrados en los sedimentos lacustres como ceniza volcánica o un tamaño de grano mayor.

En este estudio se presenta una investigación detallada de magnetismo de rocas del primer núcleo sedimentario profundo (CHD) del Lago de Chapala de 27.15 m de longitud, recuperado en 2014 por la Universidad de Guadalajara (UDG), al cual se tuvo acceso a través de una colaboración entre el departamento de Química (UDG) y el Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA) de la UNAM. Se discuten los posibles vínculos entre los parámetros magnéticos y los procesos climáticos y ambientales durante los últimos 10 ka, y se pone de manifiesto la correlación entre los registros de los parámetros direccionales registrados en el núcleo y las correspondientes variaciones previstas por el modelo global SHA.DIF.14k.

## 1.2 Justificación

Los minerales ferromagnéticos poseen la capacidad de registrar el campo magnético, mientras que las diatomeas son indicadores del ambiente en el que se formaron –vivieron-. Con esta idea surge este estudio que es único en su tipo, debido a la metodología multidisciplinaria y a la profundidad del núcleo.

Con los conocimientos previos del magnetismo de las rocas y diatomeas, se plantea describir la evolución magnética y climático-ambiental del lago de Chapala, aprovechando la oportunidad que nos brinda esta secuencia sedimentaria de 27.15m del depocentro del lago.

Como se mencionó anteriormente, el núcleo CHD-B es el primer barreno profundo aplicado en el lago de Chapala al cual se le está explotando su contenido científico en sus sedimentos por parte de las siguientes dependencias: Universidad de Guadalajara, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y Universidad Nacional Autónoma de México. Por tanto, este estudio es innovador y aportará información acerca de la evolución climática-magnética del mismo. En general, en México existen pocos estudios donde se utiliza el magnetismo ambiental, de entre los cuales destacan los realizados por Vázquez-Castro 2008, 2011 y 2012.

Por otra parte, el uso de diatomeas como indicadores del paleoambiente es muy variado, como los mostrados por Segura García (2011) en un estudio realizado en la Cuenca del Alto Lerma, y el de Israde-Alcántara et. al (2010), realizado en el Río Lerma, por mencionar algunos.

### 1.3 Planteamiento del problema

Los sedimentos lacustres son excelentes indicadores de lo que sucede dentro del cuerpo de agua, así como de lo que sucede a sus alrededores –cuenca-, registrando de manera continua cambios tales como la variación del campo magnético a través del tiempo, así como cambios climático-ambientales.

El lago de Chapala, siendo el cuerpo de agua más grande de México, funciona como el vaso regulador de la cuenca hidrológica de mayor importancia en el país, la cuenca del Lerma-Santiago-Chapala. Este lago también es de vital importancia para las comunidades que tiene y se desarrollan a su alrededor por ser la principal fuente de abasto de agua, incluyendo la Zona Metropolitana de Guadalajara.

Hay pocos estudios en el lago de Chapala; la mayoría relacionados a la geología estructural, hidrología, mientras que de paleomagnetismo y paleo-climáticos son escasos.

El presente estudio se basa en un núcleo de ~27 m de longitud, haciéndolo innovador ya que es el núcleo más profundo sacado del depocentro del lago, comprendiendo, aproximadamente, los últimos 10 ka.

### 1.4 Objetivos

Determinar la evolución magnética y climática en el Lago de Chapala usando diferentes parámetros; es una tesis de tipo multiproxy, que se apoya del magnetismo de rocas y diatomeas, para determinar su evolución magnética-ambiental en el Holoceno.

### 1.4.1 Objetivos Particulares

- a) Identificar variaciones seculares del campo magnético para aumentar los datos paleomagnéticos de la zona. A partir de la magnetización de tipo detrítica se obtendrá la magnetización semi-continua del CMT.
- b) Indicar el clima-ambiente existente en el momento del depósito del sedimento con la ayuda de la identificación de diatomeas, para proponer la evolución climático-ambiental de la zona.
- c) Identificar la posible relación entre los parámetros magnéticos con la cantidad o tipo de diatomeas identificadas para, de esta manera, evidenciar los cambios climático-ambientales del lago y sus alrededores –cuenca-.

## 1.5 Antecedentes

A partir de correlaciones encontradas entre las variaciones sincrónicas entre los registros de los depósitos sedimentarios alóctonos y los registros de susceptibilidad magnética en el lago Lough Neagh (Irlanda del Norte), los métodos magnéticos han sido utilizados con éxito para evaluar una variedad de cambios ambientales en las secuencias de sedimentos lacustres (Thompson et al., 1975). Por otra parte, las mediciones sistemáticas de núcleos orientados pueden proporcionar información invaluable sobre la variación secular del campo magnético terrestre a través del estudio de la inclinación magnética y paleointensidad relativa.

El lago Chalco -en la Cuenca de México-, formado durante el Pleistoceno, es quizás el lago mexicano más estudiado. En los últimos 25 años se han llevado a cabo diversas investigaciones, orientados al modelado por gravedad de la cuenca del lago, estudios paleoambientales, palinológicos y magnéticos de sus sedimentos lacustres (e.j. Urrutia-Fucugauchi y Chávez (1991); Lozano et al., (1993 y 1994); Caballero y Ortega (1998); Ortega et al., (2000), Lozano-García y Ortega et al., (2017)).

Por otra parte, el lago de Chapala ha sido objeto de un conjunto de diversos estudios: hidrológicos y sedimentológicos (De Anda et al., 1998; Fernex et al., 2001), geológicos (Zárate-del Valle et al., 2002); hidro-meteorológicos (Filonov et al., 2002), etc. Sin

embargo, las investigaciones de magnetismo de roca son escasas (e.j. Michaud et al., 2006; Gogichaishvili et al., 2016), así como los estudios paleomagnéticos (Gogichaishvili et al., 2016), a pesar de ser el cuerpo natural de agua dulce más grande de México. Los estudios micropaleontológicos que se están generando a partir de este núcleo profundo en el lago de Chapala incluyen estudios de diatomeas, polen y macropartículas de carbón (Zárate del Valle et al., 2012; Zárate del Valle et al., 2013; Zárate del Valle et al., 2014; Zárate-del Valle et al., 2016; Israde-Alcántara et al., 2015; Walter Doerfler, et al., 2015; Espinoza-Encinas et al., 2015).

Existen diferentes estudios basados en las propiedades magnéticas donde se utilizan los parámetros magnéticos como la susceptibilidad magnética ( $\kappa$ ), la adquisición de curvas de magnetización remanente isotermal (MRI), entre otras, para datar los sedimentos (e.j. Irurzun et al., 2014)., Chaparro et. al (2008) utiliza núcleos sedimentarios para mejorar la curva de variación secular del centro de México, midiendo propiedades magnéticas como  $\kappa$ , ciclos de histéresis, MRI y MRA. Böhnell et al., 2002 igualmente utiliza el paleomagnetismo para determinar la curva de variación secular en los últimos 40,000 años en México.

## Capítulo II Bases teóricas

### 2.1 Historia del Lago de Chapala

De acuerdo a Leyden (2015), en tiempos históricos el *Lago de Chapala* estaba inmerso en un gran lago que abarcaba gran parte de Jalisco, Michoacán y Aguascalientes, conocido como el lago de Jalisco.

El remanente más grande del *Lago de Jalisco* es el *Lago de Chapala* –con una superficie de tan sólo 905 km<sup>2</sup>, en comparación con los 13679 km<sup>2</sup> de su predecesor–. Tal reducción en su superficie y volumen es debida a rupturas en las paredes de las cuencas y, eventualmente, al drenaje de sus aguas.

### 2.2 Características del lago de Chapala

El lago de Chapala es de origen tectónico, es decir se forma por procesos de deformación, de manera específica por fallamiento de tipo normal, formando así depresiones (grabens y semi grabens) por rotación de bloques (Pasqueré et al., 1991).

Esté lago (Figura 1.0) se ubica en el sector nor-oeste de Michoacán, en donde desemboca el río Lerma. Delgado (1992) propuso que la cuenca se formó por procesos de tipo tectónico-tensional, los cuales tuvieron lugar en los últimos 6.7 millones de años. Por su parte, Israde-Alcántara et al. (2010) confirman esta edad con un fechamiento de los depósitos lacustres levantados al noroeste del Lago, con una edad de  $7.00 \pm 0.3$  millones de años.



Figura 1.0 Vista panorámica de lago de Chapala. (Cortesía de Isabel Israde Alcántara).

## 2.3 Historia del Magnetismo

El comportamiento de la magnetita como imán se conoce desde la antigüedad, mientras que la existencia del campo magnético de la Tierra se conoce por sus aplicaciones a la navegación con el uso de la brújula, el cual aparece por primera vez en Occidente hacia el siglo XII, aunque es posible que en china se conociera con anterioridad (Udias, 1986).

La declinación magnética (D) y su variación de un lugar a otro fue observada por los navegantes, principalmente españoles y portugueses de los siglos XV y XVI, y se encuentra ya descrita con detalle en la obra de Martín Cortés, publicada en 1551, en la que se distinguen los polos magnéticos de los geográficos (Udias, 1986).

El descubrimiento de la inclinación magnética (I) fue obra de R. Norman, quien describió este fenómeno en un opúsculo publicado en Londres en 1576. En 1600 aparece la obra de William Gilbert (1540-1603), titulada '*de Magnete*', que es considerada como el primer tratado de magnetismo, aunque en ella se refiere al trabajo anterior de Pedro Peregrino de

Picardy del siglo XIII. Gilbert describe sus experimentos con una esfera de magnetita que construyó como modelo de las propiedades magnéticas de la Tierra y afirma, por primera vez, que la Tierra es un inmenso imán (Udias, 1986).

## 2.4 Variaciones del campo magnético

### 2.4.1 Variación secular

Gracias a los registros magnéticos continuos (magnetogramas) obtenidos en observatorios distribuidos por el mundo se sabe que la intensidad y la dirección del campo magnético terrestre varían a lo largo del tiempo. Existen variaciones del campo magnético de diferentes tipos; dichas variaciones dependen de su origen, dividiéndose en dos grupos principales: variaciones de origen extraterrestre y variaciones de origen interno (figura 1.1). A continuación, se mencionan éstas de manera general en la tabla 1.1, y de manera particular la variación secular (VS), que es la que nos concierne en este estudio.

<b>Nombre</b>	<b>Duración</b>	<b>Causa</b>
<b>Micropulsaciones variaciones subacuáticas</b>	De fracciones de segundo a unos pocos segundos	Campo externo
<b>Tormentas magnéticas variación diurna</b>	Un par de minutos	Campo externo
<b>Variación secular</b>	De decenas a centenas de años	Campo no-dipolar (turbulencias en el núcleo)
<b>Variaciones en el momento dipolar geomagnético</b>	De decenas a centenas de años	Campo no-dipolar (turbulencias en el núcleo)
<b>Excursiones</b>	Centenas de miles de años	Inversiones abortadas
<b>Variaciones en la intensidad</b>	Miles de años	campo dipolar
<b>Paleovariación secular</b>	Decenas de miles de Años	Campo no-dipolar y variaciones en el dipolo
<b>Cambios de Polaridad</b>	Millones de años	Campo dipolar y no-dipolar interno

Tabla 1.1 Muestra las variaciones del campo magnético a través del tiempo, así como la causa que lo genera.

La VS es una variación del campo magnético a largo plazo –1 hasta  $10^5$  años-. Otro efecto importante de la VS del campo magnético terrestre es la deriva hacia el Oeste, que se produce en las características generales del campo no-dipolar. Dicha deriva da lugar actualmente a un desplazamiento de las características del campo del orden de  $2^\circ$  de longitud por año.

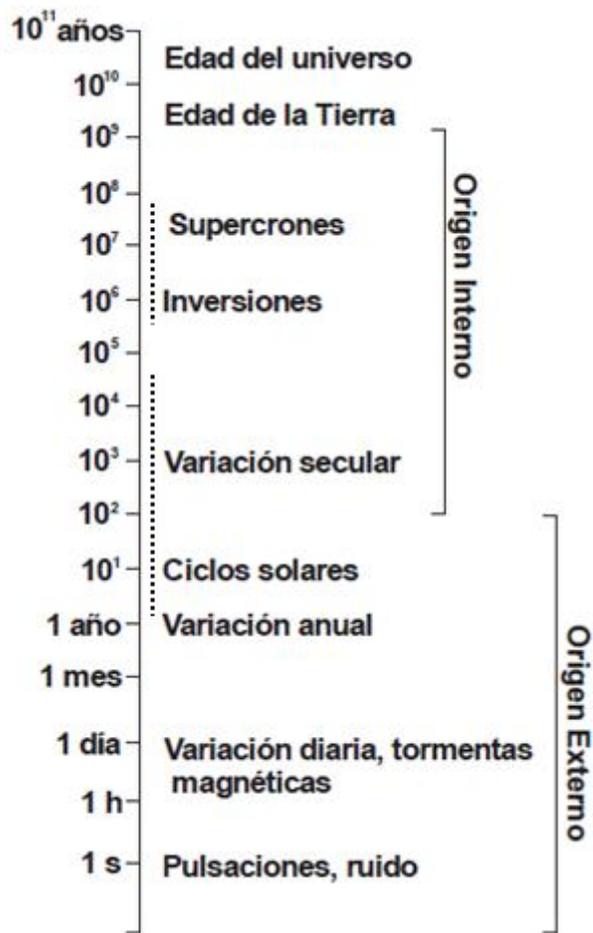


Figura 1.1 Esquema de las variaciones del campo magnético terrestre, donde se indican los cambios que ocurren en el campo magnético Terrestre a través del tiempo. Modificado de Caccavari, 2010.

## 2.5 Origen del Campo Magnético Terrestre

Más del 90% del campo medido sobre la superficie de la Tierra es de origen interno y se conoce como el campo principal; es la suma del campo dipolar ( $B_o$ ) y el campo residual ( $B_r$ ). El campo restante corresponde al campo cortical ( $B_c$ ) y al campo magnético externo ( $B_t$ ) (Muñiz, 1997).

El campo dipolar  $-B_o-$  es aquel que genera el núcleo externo líquido de la Tierra, el campo residual  $-B_r-$  se produce por pequeños dipolos que se encuentran en el manto. El campo cortical, o también conocido como campo de anomalías, es el que se produce en la corteza terrestre, mientras que  $B_t$  es el que se produce en el exterior de la Tierra, principalmente por la actividad solar. (Muñiz, 1997).

Se sabe que existen dos maneras de producir un campo magnético. La primera es por medio de un cuerpo imantado (inducido), y la otra es a través de una corriente eléctrica (por el movimiento de sus cargas).

Al principio se creía que el origen del campo magnético provenía de una magnetización remanente permanente de la Tierra. Posteriormente, con la ayuda de la sismología, se descubrió que al núcleo externo de la Tierra (formado principalmente por Fe y Ni) no lo atravesaban las ondas S (transversales), incapaces de atravesar medios líquidos, mientras que las ondas P (longitudinales) sí; por tanto, se dedujo que se encuentra en estado líquido. Por ello, no podía estar imantado de manera permanente, ya que tiene temperaturas superiores a los 2000 °C, muy por encima de las temperaturas de Curie del Fe y del Ni (770°C y 350°C, respectivamente). Por tanto, son incapaces de mantener una magnetización remanente.

Actualmente se considera que el campo magnético principal se origina en el núcleo externo líquido de la Tierra, por corrientes eléctricas convectivas generadas en éste. Esta teoría es conocida como el dinamo-autosustentable.

## 2.6 Generalidades del campo Magnético

### 2.6.1 Campo magnético

El campo magnético Terrestre es generado por el movimiento del núcleo externo líquido –eléctricamente conductor– y por la rotación de la Tierra. Es de carácter vectorial, es decir, en cualquier punto tiene dirección y magnitud (intensidad). El campo magnético es definido generalmente por las cargas eléctricas que lo generan.

La magnitud del campo magnético  $H$  es proporcional a la fuerza de la corriente eléctrica  $i$  que lo genera. El caso más simple es el del campo magnético generado por una corriente eléctrica en un conductor rectilíneo infinito (Figura 1.2), a través del cual circula una corriente  $i$ . A una distancia  $r$  del mismo, la magnitud de  $H$  queda dada por la siguiente ecuación, la cual es el resultado de la aplicación de la “Ley de Ampere”

$$H = \frac{i}{2\pi r}$$

Las unidades del campo magnético  $H$  son el A/m.

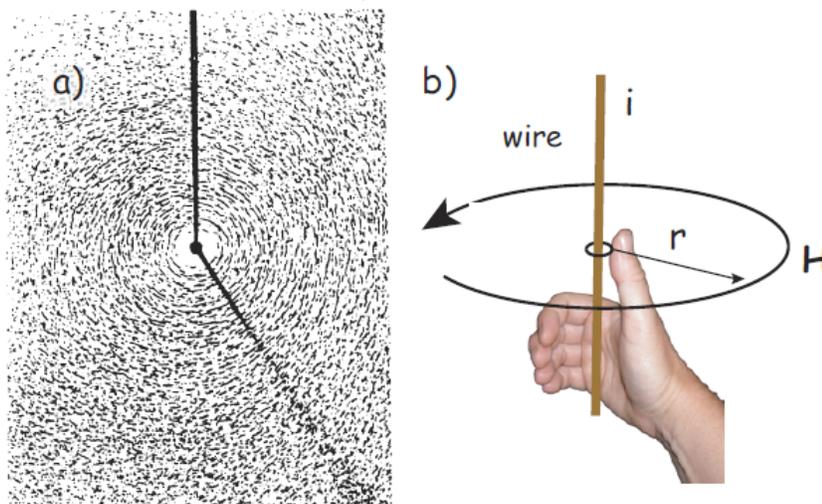


Figura 1.2 (a) Representación del campo magnético en un conductor rectilíneo uniforme (a) Se observa la distribución de las limaduras de hierro sobre una lámina perforada por un alambre con una corriente  $i$ . (b) Regla de la mano derecha –relación entre el campo magnético y la corriente en el alambre-. Tomada de Tauxe (2008).

## 2.6.2 Momento magnético

Una corriente eléctrica en un alambre en forma de espira, un imán –minerales magnéticos-, un electrón, una molécula y un planeta como la Tierra poseen momentos magnéticos.

El momento magnético ( $m$ ) de un imán es una cantidad vectorial que determina la fuerza que dicho imán ejerce sobre corrientes eléctricas, y la tendencia de dicha fuerza a rotar alrededor de un eje provocada por el campo magnético. El momento magnético se genera por una corriente  $i$  y depende del área de la espira formada por la corriente (entre mayor sea la espira, mayor será el momento) Tauxe (2008). Por lo tanto, la magnitud del momento puede cuantificarse a través de la siguiente expresión:

$$m = i\pi r^2$$

Con unidades de  $\text{Am}^2$

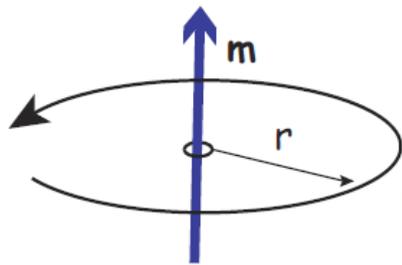


Figura 1.3 Momento magnético generado por una espira con corriente  $i$ , y con un radio  $r$ . Tomada de Tauxe (2008).

## 2.6.3 Flujo del campo magnético

El campo magnético es un campo vectorial porque en cualquier punto el campo tiene una dirección y magnitud (intensidad). Considerando el campo magnético de un imán en barra, como el que se muestra en la figura 1.4, la dirección del campo en cualquier punto está dada por las flechas, mientras que la fuerza depende de la proximidad de las líneas del campo. Las líneas magnéticas representan el flujo magnético.

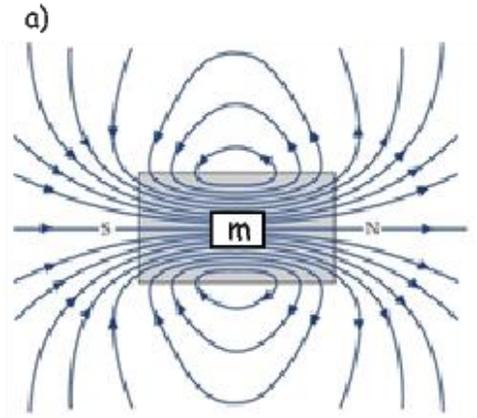


Figura 1.4 Esquema que muestra el flujo magnético generado por un imán en barra, la dirección del flujo está marcada por la dirección de las flechas. Tomado de Tauxe, 2008.

### 2.6.4 Energía Magnética

La energía magnética es conocida también como magnetismo; es el fenómeno por el cual los objetos ejercen fuerzas de atracción o repulsión.

Un momento magnético  $m$  en presencia de un campo magnético  $B$  genera una energía magnetostática ( $E_m$ ) asociada con este. Esta es la energía que tiende a alinear la aguja magnetizada de una brújula con el campo magnético (Figura 1.5). La  $E_m$  tiene como unidades los Joules y es mínima cuando  $m$  está alineado con  $B$ .

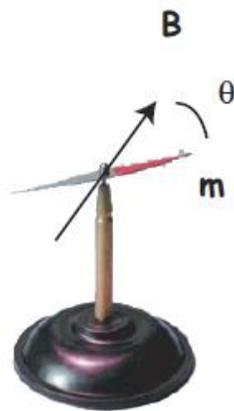


Figura 1.5 La aguja magnetizada, con un momento magnético  $m$ , tiende a alinearse a sí misma con el campo magnético  $B$ . Fuente: Tauxe (2008).

### 2.6.5 Magnetización y susceptibilidad magnética

La magnetización o polarización magnética es un campo vectorial  $\mathbf{M}$ , con unidades de A/m. La magnetización representa la densidad de momentos dipolares magnéticos inducidos o permanentes en un material magnético. El origen de estos momentos magnéticos, responsables de la magnetización, se debe a las corrientes eléctricas que provienen del movimiento de partículas atómicas como protones y electrones. La relación entre la magnetización inducida en un material  $\mathbf{M}$  y el campo externo  $\mathbf{H}$  es:

$$\mathbf{M} = \chi_b \mathbf{H}.$$

El parámetro  $\chi_b$  es conocido como la susceptibilidad magnética neta del material; definida como la capacidad de un material a ser magnetizado bajo la influencia de un campo magnético externo, representada por una función compleja que depende de la orientación, temperatura, estado de excitación, escala temporal de observación y campo aplicado. Sin embargo, casi siempre se representa como un escalar. Como  $\mathbf{M}$  y  $\mathbf{H}$  tienen las mismas unidades, la susceptibilidad magnética neta  $\chi_b$  es adimensional.

### 2.6.6 Componentes del Campo Magnético Terrestre

Para estudiar los componentes de la intensidad del campo magnético terrestre se toma como sistema de referencia un punto de la superficie de la Tierra, por ejemplo, el sistema cartesiano XYZ. La intensidad del campo magnético es  $F$ , su proyección horizontal es  $H$  y los componentes sobre los ejes vienen definidos por XYZ.

La Declinación ( $D$ ) es el ángulo (medido en grados) entre la componente horizontal del campo magnético y el norte geográfico.

La Inclinación ( $I$ ) es el ángulo (medido en grados) del vector total con respecto a la proyección en el plano horizontal.

La intensidad ( $F$ ) es la magnitud del vector total medido en Teslas (T).

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$D = \tan^{-1} \frac{X}{Y}$$

$$I = \tan^{-1} \frac{Z}{H}$$

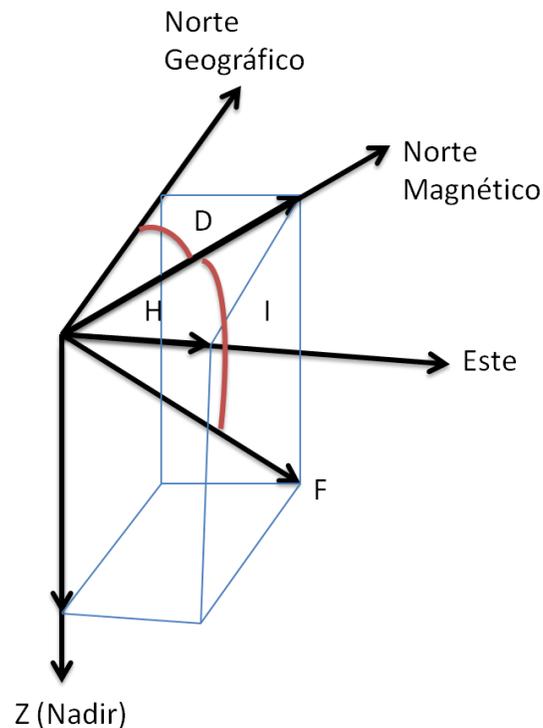


Figura 1.6. Esquema de ángulos que definen el campo magnético en un punto superficial. Descomposición vectorial del campo magnético en el sistema de referencia geográfico, D: Declinación; I: Inclinación; H: componente horizontal; F: intensidad del campo magnético. Modificado de Butler 2004.

## 2.6.7 Temperatura de Curie

La temperatura de Curie ( $T_c$ ) es la temperatura por encima de la cual los materiales ferromagnéticos pierden la capacidad de retener su magnetización, cambiando de una condición ferromagnética a una condición paramagnética. Esta temperatura fue nombrada en honor del físico francés Pierre Curie, quien en 1895 descubrió las leyes que relacionan algunas propiedades magnéticas con los cambios de temperatura.

Debajo de esta temperatura todos los átomos interactúan de tal manera que sus momentos magnéticos se acoplan y actúan en forma colectiva en la dirección del campo magnético aplicado. A esta temperatura se le conoce como temperatura de bloqueo.

Para un material antiferromagnético, su punto crítico de temperatura es la temperatura de Néel. Sin embargo, como en paleomagnetismo son útiles los minerales ferromagnéticos, la temperatura de Néel no se utiliza (Merrill, 1996).

## 2.7 Tipo de Materiales

Las propiedades magnéticas de las rocas, las cerámicas etc., están definidas por los minerales ferromagnéticos dispersos en las mismas, ya que están constituidos por un conjunto de minerales. Existen diferentes tipos de materiales que actúan de manera diferente ante la aplicación de un campo magnético. En la mayoría de los materiales, el momento magnético paralelo al campo externo producido se pierde en cuanto el campo es retirado; solo algunos son capaces de retener una magnetización remanente. A continuación se describen los diferentes tipos de materiales y cómo actúan ante un campo magnético externo.

### 2.7.1 Diamagnetismo

El diamagnetismo es el comportamiento de los materiales que no conservan una magnetización remanente, es decir, todos aquellos materiales cuyos espines de sus átomos se orientan paralelos pero contrarios al campo externo (Figura 1.7). Tienen una magnetización débil y en sentido opuesto al campo, por lo cual la susceptibilidad ( $k$ ) de este tipo de materiales es negativa, de valores muy bajos e independiente de la temperatura (Figura 1.8a). Ejemplos de este tipo de materiales son la sílice (Cuarzo), Calcita, feldespatos, el carbono, bismuto, el cobre etc.

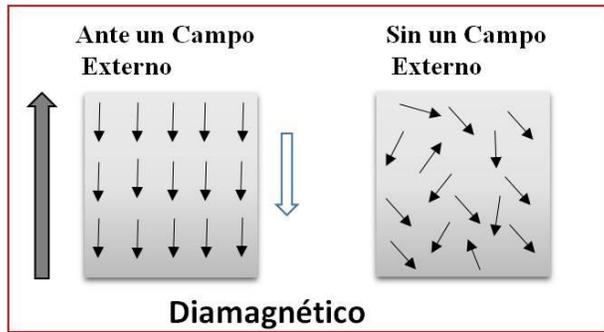


Figura 1.7 Comportamiento de los materiales diamagnéticos. En la parte izquierda está la representación gráfica de cómo se comportan ante la aplicación de un campo magnético externo (indicado por la flecha rellena). La flecha de la derecha indica la magnetización resultante indicando la dirección de la misma. La imagen de la derecha indica el comportamiento del material al dejar de aplicar un campo externo. Modificado de Caballero, 2011.

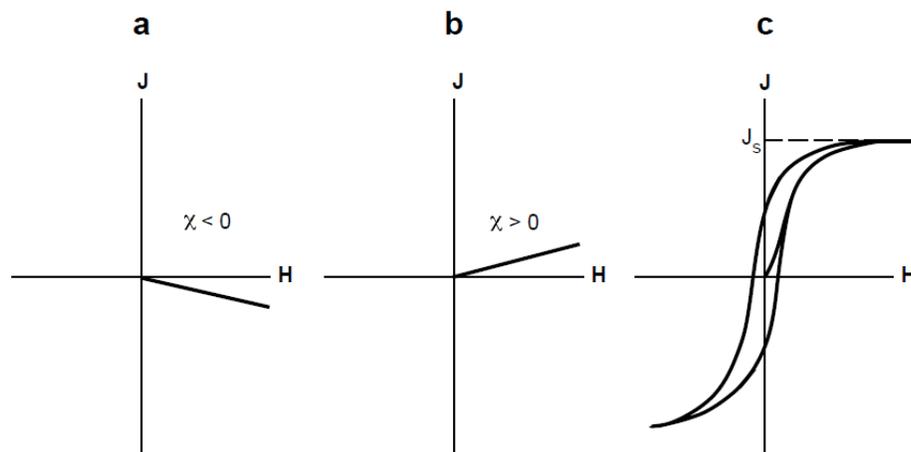


Figura 1.8 a) Se muestra la gráfica de magnetización (J) contra un campo magnético (H) para un material diamagnético. La susceptibilidad magnética es una constante y negativa. b) J contra H para un material paramagnético. La susceptibilidad magnética es una constante y positiva, c) J contra H para un material ferromagnético. El camino de la magnetización se observa en la histéresis (es irreversible) y la susceptibilidad magnética no es una constante simple. (Butler 2004).

## 2.7.2 Paramagnetismo

En los materiales paramagnéticos los efectos magnéticos de los electrones de cada átomo no se anulan entre sí, es decir, tanto los átomos como las moléculas tienen un efecto magnético neto (Figura 1.9). Sin embargo, si no hay un campo magnético externo, las moléculas se distribuyen al azar y los efectos magnéticos se cancelan entre sí, quedando magnéticamente neutro.

Estos materiales se magnetizan en presencia de un campo magnético externo, quedando alineados a favor del campo externo. Su susceptibilidad magnética es positiva (del orden de  $10^3$ ) (Figura 1.8b). Ejemplos de algunos materiales paramagnéticos son el aluminio, el titanio, el manganeso, silicatos de hierro (ej. biotita, clorita, anfíboles) y arcillas.

En los materiales paramagnéticos la  $k$  es inversamente proporcional a la temperatura. Las fuerzas magnéticas sobre las moléculas se van reduciendo cuando crece la agitación de las mismas al aumentar la temperatura. Este tipo de material no conserva una magnetización remanente al igual que los diamagnéticos.

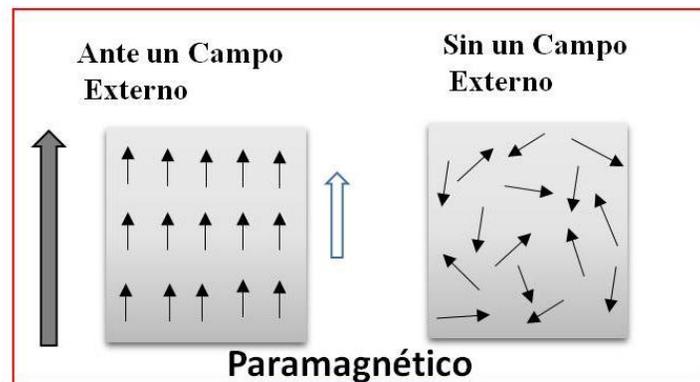


Figura 1.9 Comportamiento de los materiales paramagnéticos. La figura izquierda es la representación gráfica de cómo se comportan ante la aplicación de un campo magnético externo (indicado por la flecha rellena); la flecha de la derecha indica la magnetización resultante indicando la dirección de la misma. La imagen de la derecha indica el comportamiento del material al dejar de aplicar un campo externo. Modificado de Caballero, 2011.

### 2.7.3 Ferromagnetismo

Este tipo de materiales si conservan una magnetización remanente, aún en la ausencia de un campo magnético externo (Figura 1.8c).

Los átomos próximos entre sí tienen sus momentos magnéticos alineados, formando un pequeño imán, conocido como dominio magnético, en el que los efectos magnéticos de todos los átomos se suman. Sin un campo magnético externo los dominios magnéticos se distribuyen al azar, quedando magnéticamente neutro.

Cuando se le aplica un campo magnético externo, los dominios del material ferromagnético se orientan, sumando sus efectos a los del campo exterior, dando un efecto resultante no nulo y del mismo sentido que el campo magnético externo (Figura 1.10). Cuando desaparece el campo magnético externo, algunos dominios siguen con dicha orientación y no vuelven a su posición original. Por tanto, el material genera un campo magnético neto por sí solo, formando un imán permanente.

Lo minerales ferromagnéticos más comunes son: el hierro, el cobalto y el níquel.

Los materiales ferromagnéticos dependen de la temperatura; de la temperatura de Curie, por encima de la cual los minerales ferromagnéticos dejan de serlo y se convierten en paramagnéticos. Por ejemplo, la temperatura de Curie para el hierro es  $770^{\circ}\text{C}$ .

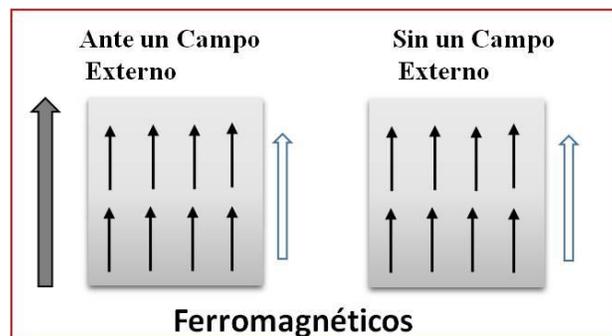


Figura 1.10 Comportamiento de los materiales ferromagnéticos. La parte izquierda es la representación gráfica de cómo se comportan ante la aplicación de un campo magnético externo (indicado por la flecha rellena), la flecha vacía representa la magnetización resultante indicando la dirección de la misma. La imagen de la derecha indica el comportamiento del material al dejar de aplicar un campo externo. Modificado de Caballero, 2011.

## 2.7.4 Antiferromagnetismo

Es el tipo de material donde el espín del electrón es compartido con la capa de electrones de un anión intermedio (el oxígeno, para el caso de los óxidos). Entre ellos opera una fuerza de super intercambio. Esto implica que la dirección del espín del electrón de los cationes vecinos queda intervenida, creando fuerzas opuestas de magnetización que resultan íntimamente mezcladas. Si la intensidad de las fuerzas está balanceada, no habrá ninguna magnetización neta resultante (1.11).

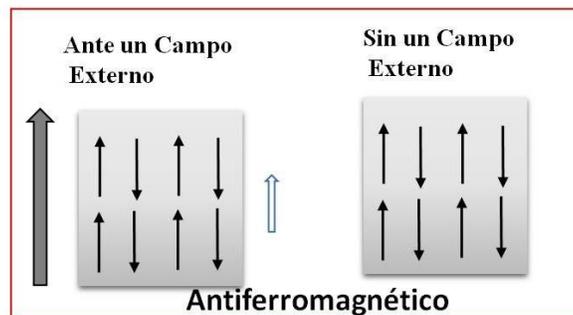


Figura 1.11 Comportamiento de los materiales antiferromagnéticos, en la parte izquierda, es la representación gráfica de cómo se comportan ante la aplicación de un campo magnético externo (indicado por la flecha rellena), la flecha vacía indica la magnetización resultante indicando la dirección de la misma. La imagen de la derecha indica el comportamiento del material al dejar de aplicar un campo externo. Modificado de Caballero, 2011.

## 2.7.5 Ferrimagnetismo

Este tipo de materiales tienen una magnetización neta resultante debido a un desbalance entre sus redes (látices), resultando una mayor que la otra (Figura 1.12). Son compuestos complejos. Ejemplos de este tipo de materiales son óxidos de hierro, tales como la magnetita ( $T_c \approx 575^\circ\text{C}$ ), la maghematita, así como la pirrotita. (Caballero, 2011).

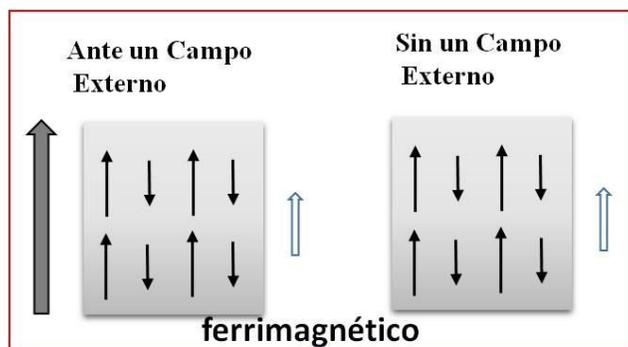


Figura 1.12 Comportamiento de los materiales ferrimagnéticos, en la parte izquierda, es la representación gráfica de cómo se comportan ante la aplicación de un campo magnético externo (indicado por la flecha rellena), la flecha vacía indica la magnetización resultante indicando la dirección de la misma. La imagen de la derecha muestra el comportamiento del material al dejar de aplicar un campo externo. Modificado de Caballero, 2011.

## 2.8 Dominios ferromagnéticos

Las rocas poseen un contenido de minerales ferromagnéticos, que se encuentran en forma de granos dentro de una matriz, que está formada principalmente por minerales diamagnéticos y paramagnéticos.

Una muestra de hierro puede encontrarse magnetizada o desmagnetizada. Debido a que los minerales magnéticos se dividen en dominios, cada dominio está totalmente magnetizado y puede orientarse al azar (figura 1.13), por tanto, puede presentar un aspecto desmagnetizado desde el punto de vista macroscópico (Reitz, 1972).

El dominio magnético representa a cada una de las zonas de un grano de material en el que existe una dirección de magnetización predominante. Un dominio sencillo SD se constituye por una partícula con magnetización uniforme.

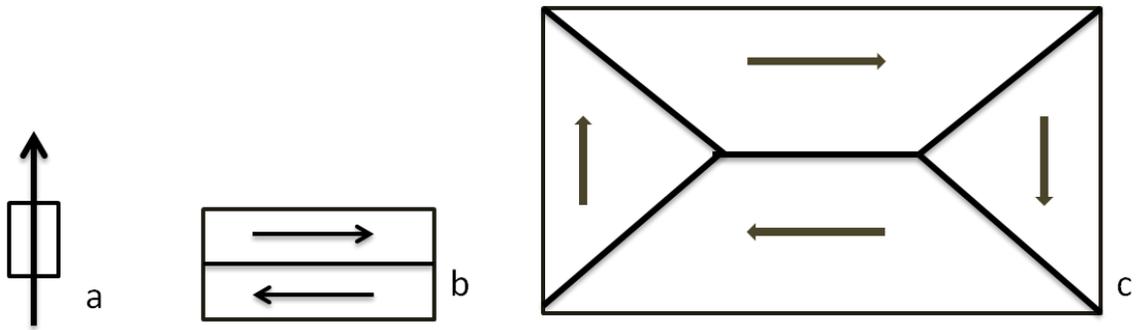


Figura 1.13 Representación de dominios magnéticos. a) dominio simple: la magnetización es uniforme y está alineada con los ejes cristalográficos. b) Multidominio: si se tienen dos dominios tienden a alinearse anti paralelamente. c) cuando se tiene más de dos dominios tienden a formar dominios cerrados.

Los diferentes dominios están separados por regiones que se conocen como –pared de Bloch (figura 1.14) -, que es un volumen estrecho de transición entre dos dominios magnéticos.

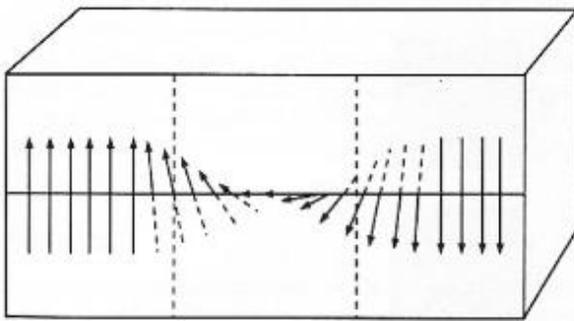


Figura 1.14 Esquema de la pared de Bloch. Tomada de Reitz (1972).

## 2.9 Minerales magnéticos

Los minerales con propiedades magnéticas son principalmente los óxidos de hierro y titanio, representados en el diagrama ternario (figura 1.15).

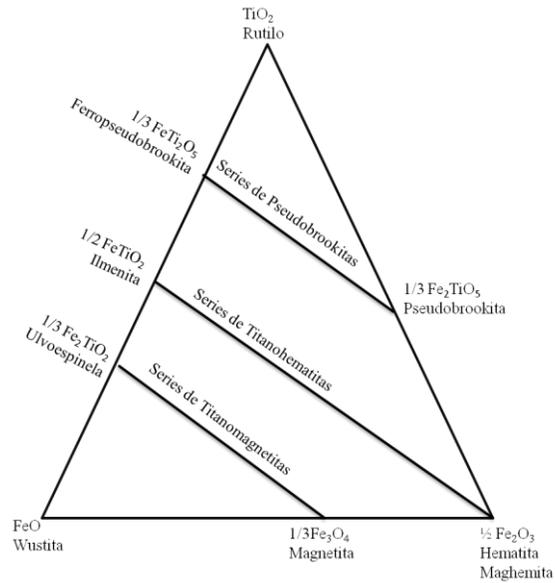


Figura 1.15. Diagrama ternario de TiO<sub>2</sub> – FeO – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Modificado de Tauxe, 2008).

Las propiedades magnéticas en las rocas, los sedimentos, suelos, etc., son debidas a los minerales ferromagnéticos dispersos en dichos materiales, constituidos principalmente por minerales diamagnéticos. A continuación (tabla 1.2) se mencionan los más importantes con sus características más significativas.

MINERALES	FORMULA QUÍMICA	ORDEN MAGNETICO	TEMPERATURA (°C) Tc/Tn	Susceptibilidad
<b>Oxidos</b>				
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	ferrimagnético	578	Intensa y positiva
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	antiferrimagnético	675	Moderada y positiva
Ilmenita	FeTiO <sub>2</sub>	antiferrimagnético	-233	Moderada y positiva
Maghematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ferrimagnético	~600	Intensa y positiva
<b>Sulfuros</b>				
Pirrotita	Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub>	ferrimagnética	320	Intensa y positiva
Greigita	Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	ferrimagnético	~333	Intensa y positiva
Troilita	FeS	antiferrimagnético	305	Moderada y positiva
<b>Oxi-hidróxidos</b>				
Goethita	FeO(OH)	antiferrimagnético	~120	Moderada y positiva
Lepidocrocita	FeOOH	antiferrimagnético	-190	Moderada y positiva
Feroxyhyta	FeOOH	ferrimagnético	~180	Intensa y Positiva
<b>Metales</b>				
Hierro	Fe	ferromagnético	770	Intensa y positiva
Níquel	Ni	ferromagnético	358	Intensa y positiva
Cobalto	Co	ferromagnético	1131	Intensa y positiva

Tabla 1.2 Muestra diferentes tipos de minerales con algunas características como su fórmula química, orden magnético, temperatura de Curie y la intensidad relativa de la susceptibilidad. Tc: Temperatura de Curie. Tn: Temperatura de Néel.

## 2.10 Ciclos de Histéresis magnética

Esta grafica muestra cómo se comportan los materiales al ser sometidos a la influencia de un campo magnético creciente, en el mismo sentido, hasta alcanzar la magnetización de saturación ( $M_s$ ) del material (puntos 0-2 de la figura 1.16. después del punto 2 la magnitud del campo se disminuye gradualmente hasta llegar a cero, donde el material conserva una magnetización magnetización remanente ( $M_r$ , punto 3). Luego el campo es aumentado en sentido inverso, eventualmente la magnetización se anulará (punto 4,  $M=0$ ). Posteriormente se aumenta la intensidad del campo hasta alcanzar nuevamente la  $M_s$ , ahora en sentido inverso (punto 5). De aquí en adelante el campo disminuye hasta cero, alcanzando nuevamente el material su  $M_r$  (punto 6). El proceso se repite iniciando un nuevo ciclo de magnetización con un campo en el sentido inicial (punto 7).

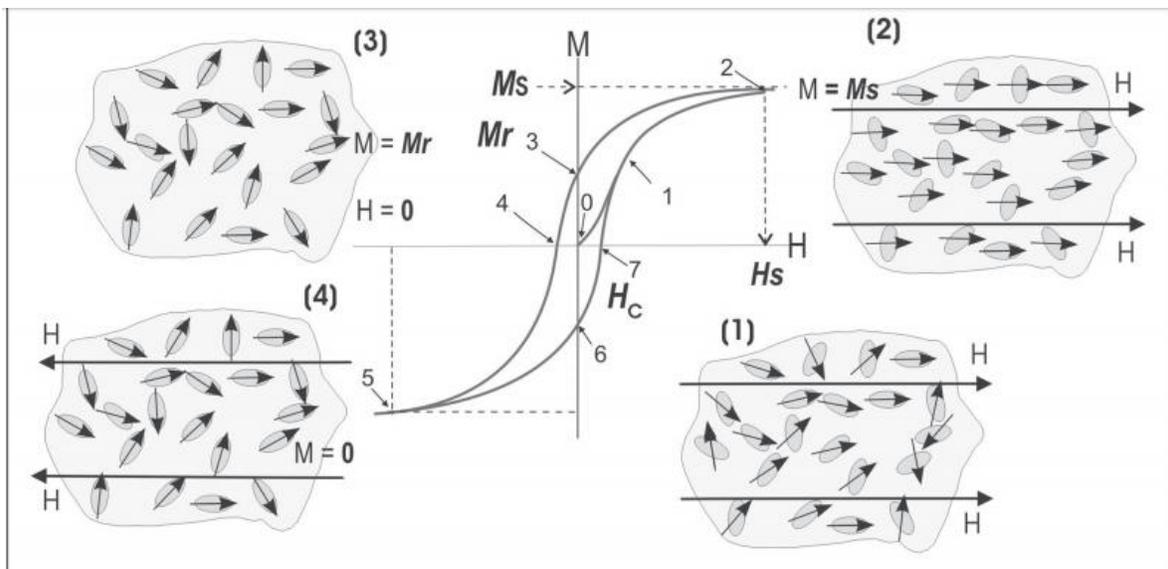


Figura 1.16 Cuando se le aplica el campo a la muestra, unos spines se incrementan a costa de otros spines acoplados. Ya que este proceso requiere la misma cantidad de energía para el campo en la dirección contraria, un ciclo completo, regresa al sistema en su estado original de magnetización, pero con una cantidad de energía gastada proporcional a un área encerrada en el ciclo. Fuente: Caballero-Miranda, 2011.

## 2.11 Paleomagnetismo

Los minerales ferromagnéticos se magnetizan de una manera espontánea en la dirección del campo magnético terrestre, dando a la roca una magnetización remanente primaria (Lanza 2009). Dicha remanencia tiende a ser guardada por tiempos geológicos, a menos que algún proceso natural proporcione la energía térmica o magnética necesaria para modificar la posición del dominio, o que sufran transformaciones mineralógicas, debidas a procesos en donde cambia la presión o la temperatura, modificando la estructura de los minerales transformándolos en nuevos minerales.

Las rocas son un archivo de la historia del campo magnético terrestre, por tanto, el archivo paleomagnético tiene una enorme ventaja sobre los otros archivos geológicos. Dada la naturaleza planetaria del campo magnético, sus datos deben ser consistentes a la escala del planeta. Por ejemplo, si las rocas en diferentes regiones del globo tienen la misma edad, la polaridad de su remanencia debe ser la misma, aparte de la facies petrográfica, y las direcciones deben coincidir en el mismo punto, que corresponde al polo magnético para esta edad.

El campo magnético Terrestre es un campo dipolar, geocéntrico y axial (Figura 1.17), es decir, se genera en el centro del planeta, es dipolar y el eje de dicho dipolo está alineado con el eje de rotación de la Tierra. Actualmente la mejor aproximación del campo magnético es un dipolo cuyo eje forma un ángulo de  $11.5^\circ$  con el eje de rotación de la Tierra.

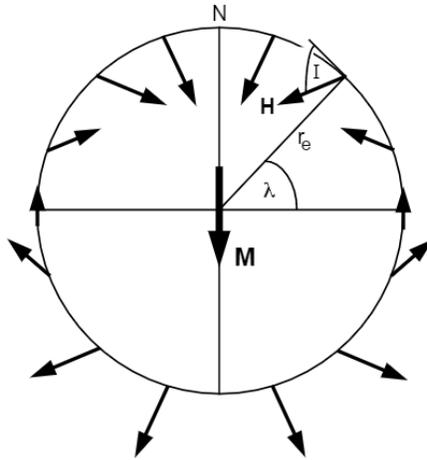


Figura 1.17 Modelo del dipolo geocéntrico axial. El dipolo magnético  $M$  se coloca en el centro de la Tierra y se alinea con el eje de rotación;  $\lambda$  es la latitud geográfica,  $r_e$  es el radio de la Tierra. Las direcciones del campo magnético en la superficie producidas por el modelo geocéntrico axial se muestran esquemáticamente; la inclinación  $I$ , se muestra para un solo lugar,  $N$  es el norte geográfico, fuente: Butler 2004.

El dipolo magnético es dipolar en un 80%, mientras que en 20% es no-dipolar. Este campo es el que aparece al remover la mejor aproximación dipolar. Dichas perturbaciones son locales, por tanto, cambian de punto a punto de la superficie terrestre. Ambos campos, dipolar y no dipolar, tienen una representación matemática, debido al análisis de los armónicos esféricos obtenido de las ecuaciones de Maxwell para su aproximación esférica de la superficie terrestre.

## 2.12 Tipos de Magnetización

Como se ha mencionado anteriormente, las características del campo magnético varían a través del tiempo. En consecuencia, el conocimiento de dicho campo en el pasado – Paleomagnetismo- tiene un gran interés geológico. Dependiendo el tipo de roca será su tipo de magnetización. La evidencia que tenemos de que existe un campo magnético en el pasado se debe a que las rocas guardan una magnetización al momento de formarse, conocida como magnetización remanente. Existen diferentes tipos dependiendo del tipo de roca.

Las rocas y sedimentos están constituidos por minerales tanto ferromagnéticos, ferrimagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos, siendo los minerales ferromagnéticos y ferrimagnéticos los que guardan la información magnética. A continuación se describen los diferentes tipos de magnetización.

### 2.12.1 Magnetización Remanente Térmica

La MRT es adquirida durante el enfriamiento, después de haber estado la muestra a temperaturas elevadas, alcanzando la temperatura de Curie –ejemplo, la magnetización de las rocas volcánicas y cerámicas en presencia de un campo magnético externo-. Adicionalmente a la MRT, también existe la magnetización termoremanente parcial (MTRP), la cual es adquirida a altas temperaturas, pero sin alcanzar la temperatura de Curie.

### 2.12.2 Magnetización Remanente Detrítica

La MRD se adquiere cuando los momentos magnéticos de las partículas magnéticas se orientan con el campo magnético terrestre mientras se depositan en el agua. Esta magnetización es la relevante para este estudio, ya que es el tipo de magnetización prevaeciente por ser depósitos lacustres. Las partículas depositadas en el lago, viajan por la cuenca con ayuda del viento o el agua.

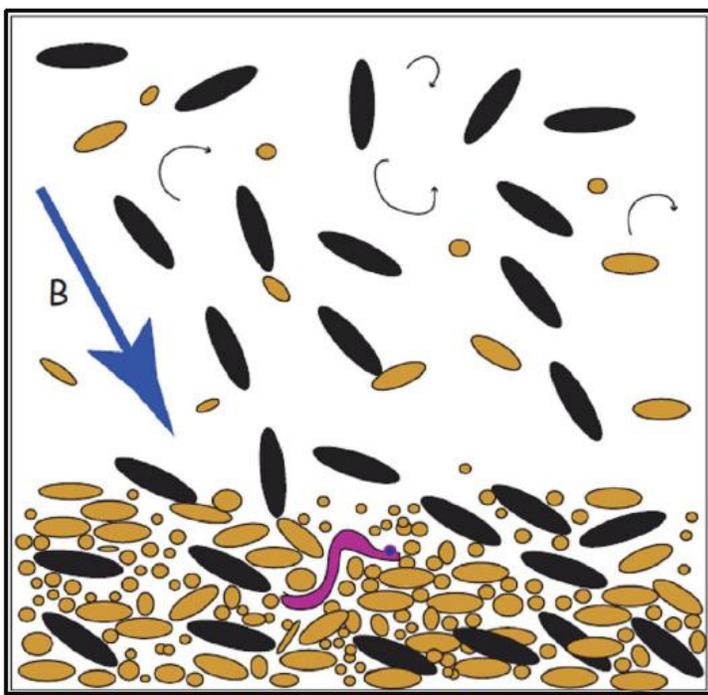


Figura 1.18 Se muestra el comportamiento de partículas magnéticas –partículas en negro- al momento de depositarse mientras éstas se encuentran bajo la influencia de un campo magnético externo –línea azul-, (tomado de Tauxe, 2008).

### 2.12.3 Magnetización Remanente Química

Este tipo de magnetización se adquiere debido a la alteración química de los diferentes minerales, cambiando sus propiedades magnéticas.

## 2.13 Magnetismo ambiental

El uso del magnetismo ambiental ha tenido auge en las últimas décadas, a partir de 1970. Es una ciencia multidisciplinaria que utiliza las técnicas del magnetismo de rocas (Thompson y Oldfield, 1986) para obtener información relacionada con la formación, transporte, deposición y alteraciones post-deposicionales de los minerales magnéticos bajo la influencia de un amplio rango de procesos ambientales. Su uso se ha aplicado a los estudios de cambio climático, procesos de contaminación ambiental, entre otros (Evans y Heller, 2003).

Todos los materiales responden de alguna manera ante la aplicación de un campo magnético, y los minerales de hierro son sensibles a una serie de procesos ambientales, lo que hace que las mediciones magnéticas sean muy útiles para la detección de señales asociados a los cambios de los procesos ambientales (Liu, 2012).

El conocimiento sobre las rocas a través de los minerales magnéticos se debe a las propiedades magnéticas de la mineralogía magnética y cambios en su concentración, tamaño de grano y forma; esto es lo que se conoce como “magnetismo ambiental”.

El magnetismo ambiental está interesado en los minerales, tratando de ponerlos en el lugar y tiempo adecuados en el ciclo ambiental, determinando su tipo, cantidad y tamaño de grano – Lanza, 2009- .

## 2.14 Diatomeas como indicadores de cambios ambientales en Lagos

Las diatomeas –o *Bacillariopyta*- son algas microscópicas -2 a 500 micras (0.5mm)-, unicelulares y eucariotas. Son conocidas muchas de sus especies, y son las mismas en diferentes regiones, compuestas en un 60% de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2010). Son cosmopolitas; es decir, su distribución es prácticamente mundial.

Las diatomeas se distinguen por la presencia de una pared celular inorgánica compuesta de sílice ( $\text{SiO}_2$  hidratado). La pared o frústulo consta de dos partes llamadas valvas. Las diatomeas han evolucionado hasta tener elaboradas paredes celulares de sílice que reflejan el tipo de hábitats a los que se adapta la especie en particular.

Las diatomeas son abundantes en casi todos los hábitats donde haya agua –océanos, lagos, arroyos, musgos, suelos, incluso la corteza de los árboles-. Las diatomeas crecen como células individuales forman filamentos o colonias simples.

Hay toda una gama de especies de diatomeas presentes en la Tierra, de 20 mil hasta 1-2 millones.

Las algas (incluyendo las diatomeas) son organismos fotosintéticos. Se estima que el 40% del oxígeno de la Tierra ( $\text{O}_2$ ) es producido por ellas.

Las diatomeas tienen uno de los tiempos de generación más cortos de todos los indicadores biológicos. Se reproducen y responden rápidamente al cambio ambiental y proporcionan indicadores de alerta temprana tanto de los aumentos de la contaminación como del éxito de la restauración del hábitat. Las diatomeas se pueden encontrar en casi todos los hábitats acuáticos, de modo que el mismo grupo de organismos puede ser utilizado para la comparación de arroyos, lagos, humedales, océanos, estuarios e incluso algunos hábitats acuáticos efímeros. Las diatomeas se pueden encontrar en substratos en arroyos, incluso cuando están secos, por ello pueden ser comparados en la mayoría de las épocas del año. Los frústulos de diatomeas se conservan en los sedimentos y registran la historia del hábitat si se encuentran sedimentos no perturbados en ecosistemas lóticos, como en embalses o deltas donde los ríos y arroyos drenan.

### 2.14.1 Formas de las Diatomeas

Los frústulos de las diatomeas son muy adornados, generando una gama asombrosa de formas. La forma del frústulo de la diatomea es específica de la especie. Es decir, las

relaciones evolutivas de las diatomeas y sus nombres (Taxonomía de Diatomeas) se han basado en el frústulo de sílice.

Se distinguen dos grupos principales de diatomeas

- 1) Coscinodiscophyceae o diatomeas céntricas: células con simetría radial –alrededor de un punto-. Son circulares vistas de frente, son inmóviles, carecen de rafe o pseudorafe.
- 2) Bacillariophyceae o diatomeas pennales, células con simetría bilateral –alrededor de una línea-. Son valvas alargadas, con un plano longitudinal medio, paralelamente al cual se extiende el rafe o pseudorafe (cuando los hay), son móviles.

En general, las especies de diatomeas son muy particulares sobre la química del agua en la que viven. En particular, las especies tienen distintos rangos de pH y salinidad donde crecerán. Las diatomeas también tienen rangos y tolerancias para otras variables ambientales, incluyendo la concentración de nutrientes, el sedimento suspendido, el régimen de flujo, la elevación y diferentes tipos de alteraciones humanas (contaminación).

La morfología de las diatomeas, que determinan su clasificación, nos indica las condiciones paleo-ambientales a las que estuvieron sometidas; es decir, cada tipo de diatomea indica variación de parámetros como turbidez, salinidad, profundidad del cuerpo de agua, entre otras.

Como resultado, las diatomeas se usan ampliamente en la evaluación y monitoreo ambiental. Además, debido a que las paredes celulares de sílice no se descomponen, se pueden usar diatomeas en sedimentos marinos y lacustres para interpretar las condiciones en el pasado.

La paleoecología es un campo que utiliza valvas de diatomeas vivas y subfósiles que se conservan en sedimentos marinos y de agua dulce. Los científicos usan células vivas para entender los factores ambientales que determinan la presencia y abundancia modernas. De esta forma, los científicos pueden aplicar el conocimiento de las preferencias de las especies en condiciones modernas para interpretar las especies de diatomeas del pasado y las condiciones históricas que esas especies implican.

## Capítulo III Generalidades

### 3.1 Ubicación y vías de acceso

El lago de Chapala se ubica entre los paralelos  $20^{\circ}09'$  y  $20^{\circ}25'$  de latitud norte; los meridianos  $103^{\circ}01'$  y  $103^{\circ}26'$  de longitud oeste; altitud entre 1,600 y 2,400 msnm (figura 3.1). Ubicado en el sector occidente de Michoacán y en la parte oriental de Jalisco, en donde desemboca el río Lerma, colinda al norte con los municipios de Jocotepec, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán y Poncitlán; al este con los municipios de Poncitlán y Tizapán el Alto; al sur con el municipio de Tizapán el Alto; al oeste con los municipios de Zacoalco de Torres y Jocotepec.

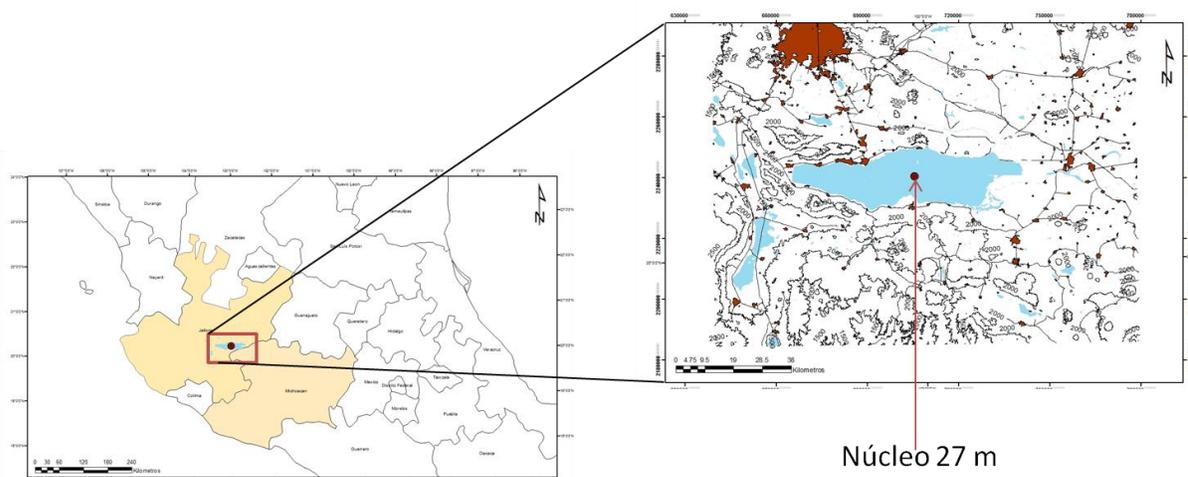


Figura 3.1 Mapa de la ubicación general de la zona de estudio el lago de Chapala, y con un punto rojo se indica donde se extrajo el núcleo, en la parte derecha se muestra una ampliación del área de estudio.

## 3.2 Fisiografía

El lago de Chapala se encuentra dentro de la provincia fisiográfica conocida como la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), en la parte Oeste (figura 3.2).

La FVTM es una franja con orientación E-W, localizada entre 19° y 20° de latitud N, extendiéndose cerca de 1200 km desde el océano pacífico hasta el golfo de México. Ocupa los Estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Puebla y Veracruz; éste ha sido definido como un arco magmático continental formado por más de 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos.

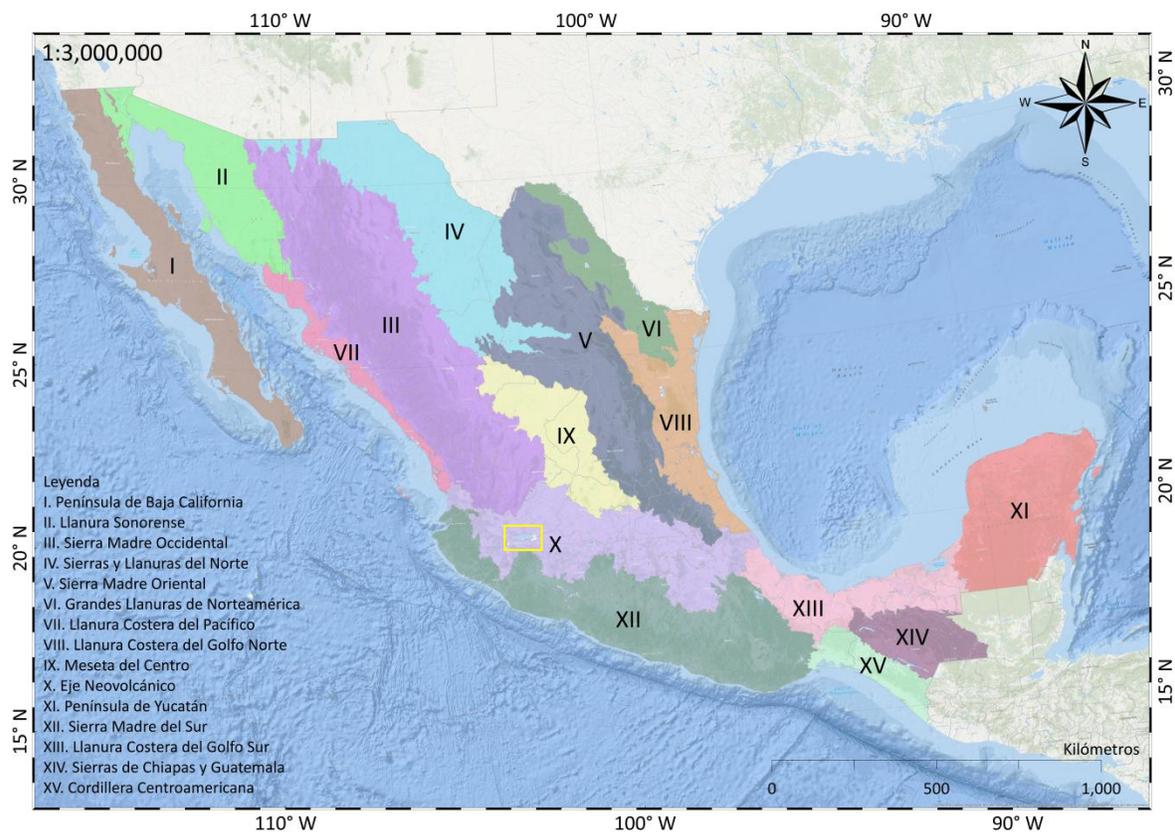


Figura 3.2 Mapa de las provincias fisiográficas de México. La zona de interés es el Lago de Chapala, que se encuentra en la Faja Volcánica Trans-Mexicana. La zona de estudio está indicada con un cuadro amarillo. Tomado de INEGI, cartas fisiográficas 1:1,000,000.

En la FVTM predominan productos volcánicos de diferentes edades, composición, cronología y tectónica. Esta provincia se encuentra dividida en sub-provincias, una de ellas corresponde a la sub-provincia de Chapala, ocupando parte de los estados de Jalisco y Michoacán, incluyendo en su totalidad a la cuenca local del lago de Chapala.

### 3.2.1 Sub-provincia Chapala

Esta región se caracteriza por manifestaciones volcánicas y grabens, formando diversos lagos de origen tectónico como el lago de Chapala, cuya agua ocupa un enorme graben compuesto de grandes fallas orientadas Este-Oeste, y otras más pequeñas Norte-Sur (Zárate y Simoneit, 2005)

El lago de Chapala se originó a partir de un sistema de fallas que formaron un graben o fosa tectónica, atrapando el agua del sistema hidrológico Lerma-Santiago.

### 3.3 Hidrografía

Una cuenca es una depresión delimitada por un parte-aguas –la parte más alta de la cuenca- en donde se delimitan las corrientes, provocando por la topografía que todas las corrientes de agua drenen hacia un mismo lugar.

El lago de Chapala se encuentra en el sistema hidrográfico cuenca Lerma-Chapala; forma parte de la región hidrológica No. 12. El lago de Chapala es la desembocadura de los ríos de esta cuenca. Este sistema es uno de los sistemas más importantes del centro de México, no solo por su gran extensión, sino también por su importancia económica, es decir, la gran cantidad de población que sostiene y las actividades de las mismas.

La cuenca Lerma-Chapala se ubica en el centro de México (figura 2.3), con un área de 54,000 km<sup>2</sup> que va desde el inicio del río Lerma (500 m) hasta el lago de Chapala. Abarca los Estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, Estado México y la Ciudad de México.

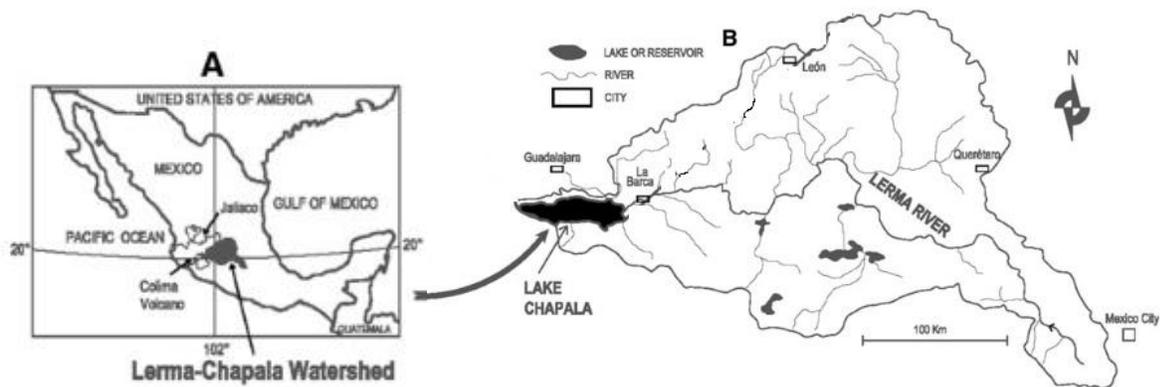


Figura 2.3 A) Mapa de la ubicación de la Cuenca Hídrica Lerma-Chapala. Se encuentra al sur de México en el centro. B) Mapa local de la cuenca Lerma-Chapala, donde se observan los ríos, más claramente el río Lerma. (Zárate et al 2010).

La corriente principal de la cuenca es el río Lerma. Nace en el Volcán del Nevado de Toluca, con una altitud de 4,690 m. con una longitud aproximada de 700 km, hasta desembocar en el lago de Chapala. Sus tributarios principales son los ríos Laja, Turbio y el Angulo.

Al interior de la cuenca se han identificado 19 subcuencas, las cuales se muestran en la tabla 2.1

### SUBCUENCAS DE LA CUENCA LERMA CHAPALA

SUBCUENCA	Superficie (km <sup>2</sup> )	% de la cuenca	Cabecera		Captación y transporte		Emisión	
			km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Alto Lerma	7509.1725	14.01	1255.11	16.72	6252.47	83.27	1.3	0.02
Antonio Alzate	2063.0600	3.85	577.15	27.97	1486.13	72.03	0.00	0.00
Chapala	3312.6350	6.18	605.72	18.28	706.40	21.32	2000.63	60.39
Cuitzeo	3814.1500	7.12	909.03	23.83	1714.98	44.97	1189.90	31.20
Duero	3553.6025	6.63	1014.62	28.55	1892.91	53.27	645.70	18.17
Ignacio Allende	6914.2950	12.90	1962.44	28.38	4951.76	71.62	0.00	0.00
Ignacio Ramírez	500.5600	0.93	181.24	36.22	319.17	63.78	0.00	0.00
Itzuhuachacolo	684.1500	1.27	422.64	61.79		0.00	261.40	38.21
La Purísima	2999.0700	5.60	562.86	18.77	2436.42	81.23	0.02	0.00
La Pólvara	307.0400	0.57	63	20.52	244.00	79.48	0.00	0.00
Lerma	5057.7200	9.44	993.47	19.64	2.14	0.04	4062.80	80.32
Melchor Ocampo	2205.2650	4.11	618.73	28.06	1505.22	68.26	81.30	3.69
Pátzcuaro	935.7775	1.75	405.04	43.29	0.4	0.04	530.2	56.67
Río Tubio	4802.9350	8.96	941.11	19.59	3861.74	80.41	0.00	0.00
Solis	3002.5425	5.60	751.3	25.02	2251.46	74.98	0.00	0.00
Tepetitlán	368.7475	0.69	161.38	43.73	207.63	56.27	0.00	0.00
Tepuxtepec	2643.1250	4.93	557.24	21.08	2085.59	78.92	0.00	0.00
Yuriria	1080.9900	2.02	365.12	33.78	715.74	66.22	0.00	0.00
Zula	1836.3925	3.43	428.63	23.35	1394.13	75.93	13.3	0.72
<b>TOTAL DE LA CUENCA</b>	<b>53591.23</b>	<b>100%</b>	<b>12775.83</b>	<b>23.84%</b>	<b>32028.29</b>	<b>59.76%</b>	<b>8786.55</b>	<b>16.40%</b>

Tabla 2.1 Nombre de las subcuencas, área que ocupa cada una de ellas y como se divide dicha área en las partes de una cuenca. Tomada de Sotelo 2005.

### 3.4 Sub-cuenca Chapala

Con una superficie de 3312 km<sup>2</sup>, es una de las subcuencas más grande del Lerma-Chapala, además alberga al cuerpo de agua dulce más grande de México.

Esta subcuenca se encuentra en el extremo occidental de la cuenca Lerma-Chapala. En el lago de Chapala se concentra la mayor parte del escurrimiento de toda la cuenca.

La subcuenca Chapala se integra por 17 municipios que rodean el lago de Chapala, de los cuales, 8 pertenecen al Estado de Jalisco y 9 a Michoacán.

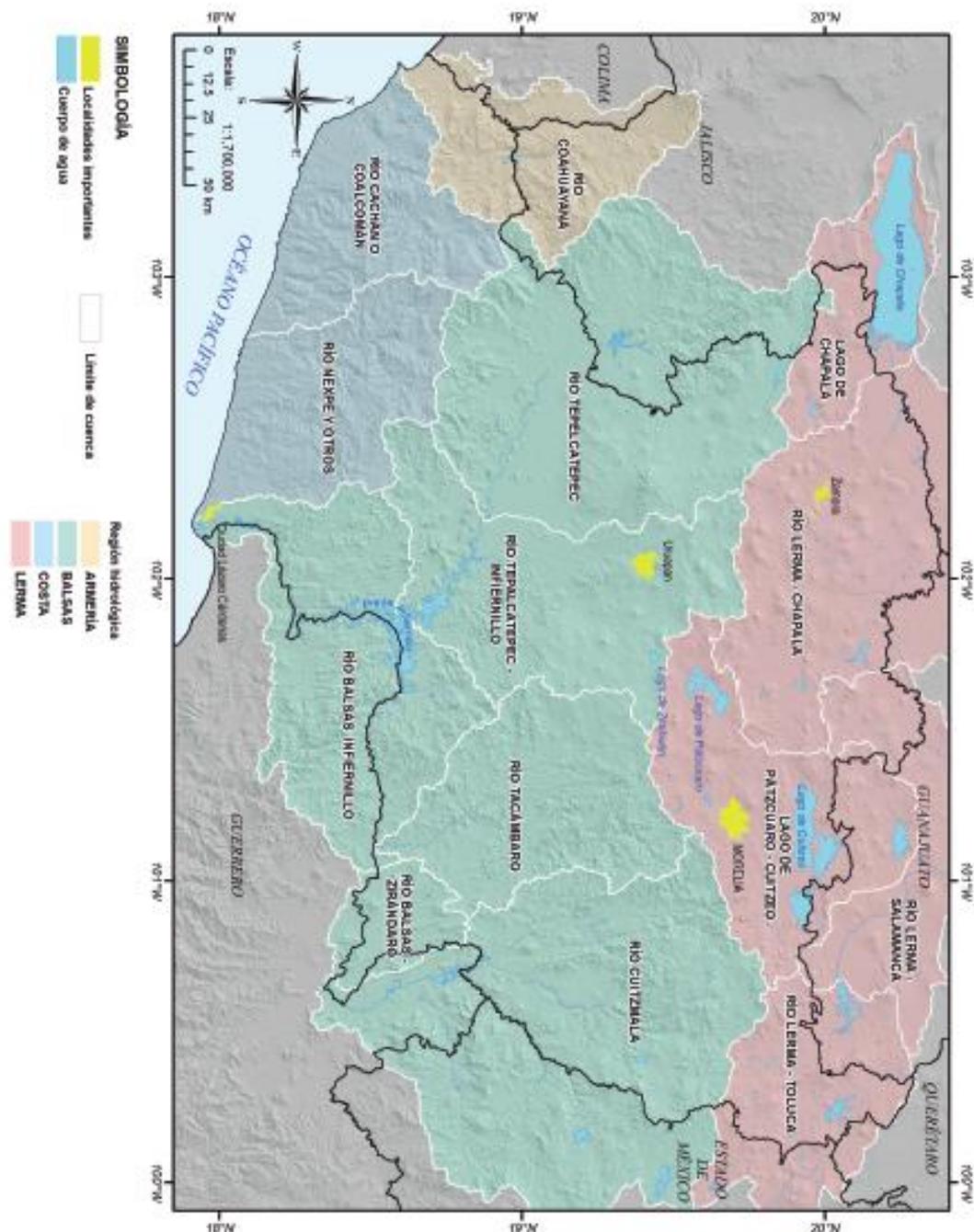


Figura 2.4 Mapa de las regiones hidrográficas y principales cuencas. Tomado de Israde y Mendoza 2017.

### 3.5 Clima

El clima de la cuenca Lerma-Chapala es en mayormente semi-cálido. Las partes central y sur tienen un clima semi-cálido sub-húmedo que en las sierras se torna templado húmedo, semifrío subhúmedo o hasta frío. Las lluvias se presentan generalmente en verano y parte

del otoño, con temperatura media anual que va desde 2-24°C. A lo largo de toda la cuenca se presentan ocho tipos de clima, como se muestran en la tabla 2.2.

<b>Tipos Climáticos</b>	<b>Localización</b>	<b>Oscilación Térmica en °C.</b>	<b>Intervalos de precipitación anual en mm.</b>
Clima Frío de montaña típico. E(T)H	Estación Nevado de Toluca.	2-5	10-230
Clima Frío de montaña con helada temporal en invierno E(T)HC	Inmediaciones del Nevadode Toluca	n.d.	n.d.
Templado húmedo con verano fresco y lluvias en invierno C(s)w(x')	Estación Romita Guanajuato.	10 a 20	5 a 185
Templado semifrío húmedo con verano fresco y lluvias en invierno C(s)w(x')b	Estación San Bernabé, Temoaya Edo. de México.	8 a 15	10 a 175
Templado semicálido subhúmedo con lluvias en verano y baja humedad (A)C(w <sub>0</sub> )(w)	Estación El Salto, La Piedad, Mich. (Lado este del Lago de Chapala)	15 a 24	5 a 230
Templado semicálido subhúmedo con lluvias en verano medianamente húmedo (A)C(w1)	Estación Tizapan el Alto, Jalisco (Periferia del Lago de Chapala)	15 a 22	5 a 190
Árido seco con lluvias en verano BS1kw(w)	Estación Presa La Purísima, Valle de Santiago, Gto.	14 a 21	10 a 130
Árido muy seco con lluvias en verano BS1kw	Estación Soledad Nueva, Dolores Hidalgo, Gto.	12 a 18	8 a 80

Tabla 2.2. Se muestran los ocho tipos de climas de la cuenca Lerma-Chapala, donde se localizan, el rango de las temperaturas en grados Celsius, así como los intervalos de la precipitación anual.

### 3.6 Geología Regional

#### La Faja Volcánica Trans-mexicana

La FVTM es una franja que atraviesa a México desde la costa pacífica hasta el golfo de México (1,200 km de largo y 100 km de ancho), este-oeste formando un ángulo de 15° respecto a la trinchera Acapulco-Mesoamericana. Con actividad volcánica y fallamiento normal desde el Mioceno al reciente. (Alaniz-Álvarez 1998; Alaniz-Álvarez et al 2005; Ego y Ansan, 2002).

El origen de la FVTM está relacionado con la subducción de las placas Ribera y Cocos por debajo de la placa de Norte América, a lo largo de la parte norte de la fosa mesoamericana (Alaniz-Álvarez 1998). Está formada por aproximadamente 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos.

El vulcanismo de la FVTM está activo desde hace 15 Ma al presente (Ferrari et al, 1994). El vulcanismo en el oeste y este de la FVTM son principalmente estrato volcanes de andesita y dacita, en el centro está constituido por escorias basálticas y conos de lava. Es un arco volcánico calco-alcalino (Ego y Ansan 2002).

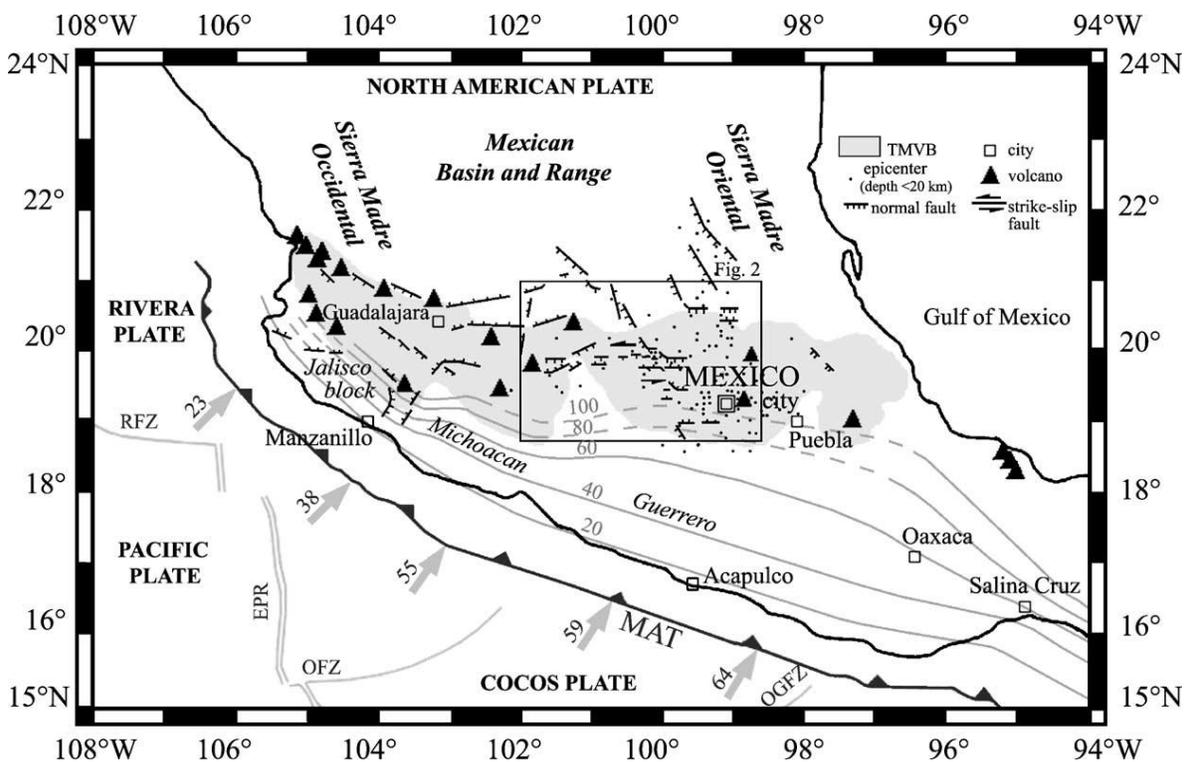


Figura 2.5 Mapa que muestra la geodinámica general y el mapa neotectónico de México. Las flechas grises

gruesas indican la tasa relativa de convergencia en mm/año, entre las placas oceánicas y continentales (Tomada de De Mets y Wilson, 1997). Las líneas grises muestran contornos de misma profundidad (km) de la placa Oceánica subducida debajo de la placa de Norte América (Pardo y Suarez, 1995). El cuadro central limita la parte central de la FVTM. EPR, (East Pacific Rise) Dorsal del Pacífico Oriental, RFZ, (Rivera Fracture Zone) la zona de fractura de la placa de Rivera, OFZ, (Orozco fracture Zone) zona de fractura de Orozco; OGFZ, (O’Gorman Fracture Zone) Zona de fractura O’Gorman; MAT, (Middle American Trench) parte media de la Trinchera Americana. Tomado de Ego & Ansan 2002, Periodo Roca Plioceno-Cuaternario (8.94%), Neógeno (4.30%) y Cuaternario (2.76%) Ígnea extrusiva: basalto (8.75%) y brecha volcánica básica (0.19%) Sedimentaria: limolita-arenisca (4.30%) y conglomerado (0.01%) Suelo: aluvial (2.75%)

### 3.6.1 Geología Local

El graben de Chapala forma parte de un sistema regional de grabens y semi-grabens, con tendencia Este-Oeste en la parte centro-occidental de la FVTM. Los sedimentos lacustres y fluviales intercalados con unidades volcánicas se han depositado en el graben y representan un registro importante de paleo-ambientes y paleomagnetismo en la historia volcánica y tectónica de la parte centro-occidente de México (Rosas-Elguera, 1998).

### 3.6.2 Estratigrafía del área

Rosas-Elguera y Urrutia-Fucugauchi (1998) definieron a la formación Chapala como una sucesión compuesta de sedimentos lacustres y depósitos de ceniza y pómez. Los sedimentos están compuestos por conglomerados con andesita (<3cm) y cuarzoarenitas, limolitas, lodolitas y diatomeas.



Figura 2.6 Mapa geológico simplificado del área de estudio. Modificado de Delgado-Granados (1992).

<b>Estratigrafía del área de estudio</b>		
<b>Nombre de la unidad Estratigráfica</b>	<b>Composición y características</b>	<b>Edad (Ma.)</b>
<b>Grupo Tizapán</b>	Andesitas y basaltos. Dichas rocas se construyeron a través de volcanes monogenéticos, como conos cineríticos, escudos y derrames de fisuras.	10.1-4.4
<b>unidades volcánicas indiferenciadas</b>	Andesitas y Basaltos	Mio-Plioceno (6.3-4.5)
<b>Grupo Chapala</b>	Está formado por rocas volcánicas ácidas relacionadas con centros volcánicos y flujos piroclásticos y de caída, mezclados con sedimentos lacustres.	6.7-4.2
<b>Grupo Travesaño</b>	Basaltos y Andesitas.	4.0-4.3
<b>Los grupos Grande, Palo Verde y Zacualco</b>	Basaltos y Andesitas.	2.7-1.4
<b>Los grupos La Zapotera, Santa Cruz y Sahuayo.</b>	Basaltos y Andesitas.	Santa Cruz 1.4-0.65. Zapotera 1.8-1.4 Sahuayo 1.9-1.3
<b>Grupo Acatlán</b>	Lavas dacíticas y riolíticas relacionadas a domos de lava y conos asociadas a fisuras tectónicas.	1.8-1.4

Tabla 2.3 presenta las 10 unidades estratigráficas definidas por Delgado-Granados (1992), observadas en la figura 2.6.

## Capítulo IV Metodología

### 4.1 Trabajo de campo

Como parte de un proyecto de investigación multidisciplinario de la Universidad de Guadalajara, apoyado por el CONACyT (proyecto CB-2011-168685), se extrajo un núcleo de 27.15 m del *depocentro* del lago de Chapala ( $103^{\circ} 02'W$ ,  $20^{\circ} 15'N$ ) en abril del 2014, empleando una máquina de perforación Usinger (80 mm y 55 mm) y una plataforma Uwitec (Zárate del Valle et al., 2014). Se obtuvieron dos núcleos: A de 303 cm y B de 2,715 cm, en secciones de 1 m de longitud. Las diferentes secciones fueron trasladadas al Laboratorio de Química del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), departamento de Química de la Universidad de Guadalajara, en donde fueron almacenados en refrigeración a  $4^{\circ}C$  hasta su posterior preparación.

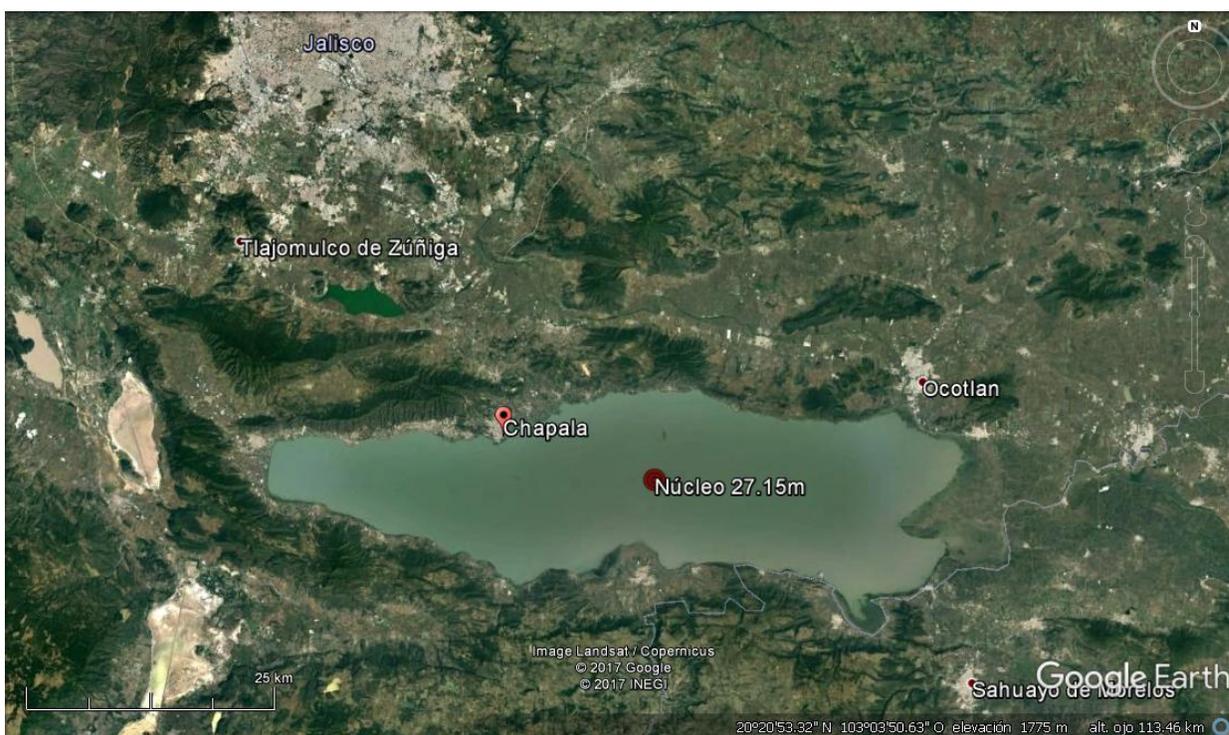


Figura 4.1 Imagen de Google Earth en la cual se muestra la ubicación de donde se extrajo el núcleo de 27.15 m.

## 4.2 Trabajo de laboratorio

Preliminarmente en el campamento de perforación en Mezcala, Jalisco, en 2014 se cortaron longitudinalmente cada uno de los tramos a fin de obtener dos sub-secciones, una de ellas se mantiene como testigo, mientras que la otra se utilizó para realizar diferentes estudios (ver más abajo para mayor información).

## 4.3 Muestreo y medición de propiedades magnéticas

La mayoría de los parámetros fueron medidos en el Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA) del Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, UNAM, a menos que se indique lo contrario.

### 4.3.1 Susceptibilidad magnética

En el CUCEI (UDG) se midió la susceptibilidad magnética continua de cada sección mediante un sensor de anillo Bartington MS2C de 100 mm  $\varnothing$ , acoplado a una unidad de control Bartington MS3. Posteriormente se obtuvieron muestras discretas cada 10 cm mediante cubos de plástico de 8 cm<sup>3</sup>, obteniendo 18 muestras del núcleo A y 261 muestras del núcleo B.



Figura 4.2. Se observa la mitad de una sección del núcleo. También se observan los cubos de 8 cm<sup>3</sup> con los cuales se obtuvieron las muestras discretas.

Las mediciones de  $\kappa$  -susceptibilidad- a baja y alta frecuencia (470Hz y 4700Hz) se realizaron en el LUGA (UNAM) utilizando un sensor Bartington MS2B acoplado a la misma unidad de control (MS3, figura 4.3).

A partir de estas mediciones se calculó el parámetro de susceptibilidad dependiente de la frecuencia ( $K_{fd}\%$ , Dearing et al., 1996).

$$\kappa_{fd}\% = \frac{k_{470} - k_{4700}}{k_{470}} \times 100$$



Figura 4.3 Equipo donde se realizó la medición de la susceptibilidad a baja y alta frecuencia. Sensor de frecuencia dual Bartington MS2B.

La medición de la susceptibilidad magnética se realiza a temperatura ambiente; es fácil de medir y relativamente rápida. Ésta es el resultado de la suma de las susceptibilidades magnéticas individuales –de cada mineral presente- (ferrimagnéticos, anti-ferrimagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos).

De manera general, la gráfica de la susceptibilidad da información acerca de la mineralogía (origen y ambiente de formación). Este parámetro depende de la concentración, del tamaño de grano y de la mineralogía.

En términos paleo ambientales, la susceptibilidad magnética permite estimar, de manera preliminar y rápida, la variabilidad litológica a lo largo del núcleo, observar la variación de los minerales magnéticos e identificar periodos de condiciones ambientales estables, ya que los periodos de mayor erosión y arrastre superficial de sedimentos –y por tanto de minerales magnéticos- se pueden asociar a decrementos en la cubierta vegetal o incrementos en la precipitación. (Vázquez Castro, 2012).

La susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia se utiliza para indicar el contenido de minerales ultrafinos (<30nm) de dominio superparamagnético (SP); sí  $\kappa_{fd}\%$

<2% su contenido de granos SP < 10%. Si  $\kappa_{fd}$ % está entre 2-10% la muestra es una mezcla de granos SP y granos gruesos, mientras que si  $\kappa_{fd}$ % se encuentra entre 10-14% su contenido de granos SP < 75% de la fracción magnética, lo cual indicaría procesos bioquímicos generados por la materia orgánica. (Bautista et al., 2014).

### 4.3.2 Magnetización Remanente Natural

La MRN de una roca se puede definir como la suma de las magnetizaciones que obtiene ésta a lo largo de su historia. Las magnetizaciones que la roca adquiere a lo largo del tiempo dependen directamente del campo geomagnético, así como de los procesos de formación de la roca y la historia posterior a la formación de la misma.

La MRN está compuesta por más de una componente; el magnetismo que se adquiere durante la formación de la roca se denomina magnetización primaria, mientras que a las magnetizaciones posteriores a su formación se les conoce como magnetizaciones secundarias.

Para determinar la dirección e intensidad de la MRN de las muestras de sedimento se utilizó un magnetómetro de giro AGICO JR6A (figura 4.4), obteniendo los valores de declinación, inclinación e intensidad de la magnetización de las mismas. Tales resultados fueron graficados contra la profundidad.



Figura 4.4 Magnetómetro de giro AGICO JR-6.

A partir de la gráfica de declinación se seleccionaron muestras representativas de todo el registro, las cuales se utilizaron como muestras piloto (33 en total), a las que se les aplicó una serie de pasos para poder caracterizar su comportamiento y aplicarlo al resto de las muestras como se describe a continuación.

Desmagnetización por pasos detallada en campos de 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60 mT por medio de un desmagnetizador de campos alternos AGICO LDA3 (Figura 4.5). La magnetización remanente después de cada etapa se midió con el magnetómetro de giro AGICO JR6. A partir de los resultados obtenidos se concluyó que, en general, las magnetizaciones secundarias se podían eliminar desmagnetizando las muestras a 20 mT. Por tanto, el resto de las muestras fueron desmagnetizadas a 20 mT, obteniéndose de esta manera la magnetización característica (original) adquirida al momento del depósito de los sedimentos.



Figura 4.5 Desmagnetizador de campos alternos AGICO LDA3.

### 4.3.3 Adquisición de Magnetización Remanente Anhistórica

Previamente se desmagnetizaron todas las muestras a 90 mT, empleando el desmagnetizador de campos alternos AGICO LDA3 (Figura 4.5). La MRA fue inducida bajo la presencia de campos magnéticos débiles (figura 4.6); su adquisición es producida por un campo magnético estacionario (CD) de 50  $\mu$ T y un campo magnético alterno (CA) de 100 mT. El efecto del campo magnético de CD es superpuesto al del campo de CA mientras éste decrece lentamente, desde un valor máximo hasta cero. El campo alterno

cumple el papel de relajar el sistema y reorientar los momentos magnéticos dipolares permanentes en forma aleatoria (Figura 4.6). Para este fin se empleó el mismo equipo AGICO LDA3, trabajando en modo de magnetizador. La magnetización resultante se midió con el magnetómetro de giro JR6.

La MRA depende de la concentración de la mineralogía magnética.

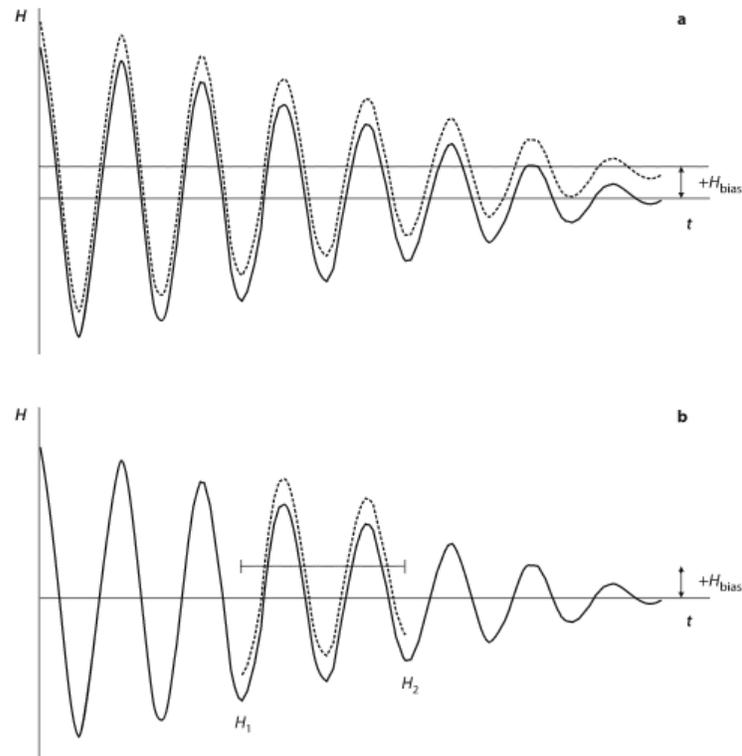


Figura 4.6 Representación de la adquisición de la MRA, donde una muestra es sometida simultáneamente a un campo magnético alterno cuya amplitud máxima ( $H_{pico}$ ) se reduce progresivamente hasta desaparecer, y un campo magnético débil cuya intensidad  $H_{bias}$  es similar al campo magnético de la Tierra. El campo alterno desbloquea los dominios con coercitividad de remanencia por debajo de  $H_{pico}$ , el campo constante destruye la simetría del campo alternante y crea una dirección preferencial de magnetización. Línea continua: campo alterno. Línea punteada: campo constante. Línea discontinua: campo total.

#### 4.3.4 Magnetización remanente isothermal

Previamente se desmagnetizaron todas las muestras a 90 mT empleando el desmagnetizador de campos alternos AGICO LDA3. Con ayuda de un magnetizador de pulsos (ASC SCIENTIFIC, modelo IM-10) fotografía 4.7, se le indujo una MRI creciente a

las muestras pilotos, empezando a partir de 25 mT hasta llegar los 700 mT, midiendo entre cada paso la magnetización resultante con el mismo magnetómetro. La magnetización obtenida a este valor de campo máximo fue considerada como su magnetización de saturación (SIRM). Posteriormente se aplicaron campos reversos a 25 mT y 300 mT. Al resto de las muestras se le aplicó directamente el campo máximo de saturación (700 mT) y los campos reversos mencionados anteriormente. Este tipo de magnetización ocurre naturalmente por el impacto de rayos.



Figura 4.7 Magnetizador de pulsos -ASC SCIENTIFIC, modelo IM-10.

#### 4.3.5 Desmagnetización por campos alternos

Esta técnica es la recomendada para el tratamiento de rocas ígneas, ya que la magnetización remanente térmica (componente original de las rocas ígneas) es muy resistente al lavado, mientras que las viscosas y las isotérmicas son muy sensibles.

El método consiste en aplicar un campo débil a la muestra, causando que los granos de menor o igual coercitividad a la del campo aplicado se alineen a él; al reducirse el campo la magnetización de estas partículas se deja en posiciones al azar, por lo que sólo quedarán las remanencias de las partículas con coercitividades mayores que la del campo aplicado.

Incrementos sucesivos en el campo aplicado, midiendo la remanencia después de cada incremento, permiten obtener el espectro de coercitividad al graficarla contra el campo aplicado. Como también se mide su dirección, es posible representarla en una red estereográfica, usualmente la de Schmidt, empleándose círculos rellenos en el caso de inclinaciones positivas.

### 4.3.6 Ciclo de Histéresis

Se determinó la curva de histéresis para 10 muestras representativas a lo largo de todo el núcleo con el fin de determinar el estado de dominio magnético de las partículas en el sedimento.

Posteriormente se graficaron las variaciones de los cocientes  $S_{-25}$  y  $S_{-300}$  y los cocientes inter-paramétricos (MRA/k, SMRI/k y MRA/SMRI) versus profundidad (Fig. 6a) para analizar la variación del tamaño de grano magnético a lo largo de los perfiles (Bartington Instruments. Operation manual). Así, se agruparon las gráficas según los parámetros de los que dependían, es decir, las gráficas que dependen de la concentración se colocan juntas, al igual que las que dependen del tamaño de grano.

### 4.3.7 Determinación de tasa de sedimentación y variaciones del campo magnético

Se empleó el programa `archaeo_dating`, implementado en Matlab (Pavón-Carrasco, 2011) utilizando el modelo SHA.DIF.14K que abarca los últimos 14 ka (figura 4.8). En este programa se introducen los datos de las coordenadas geográficas del sitio (lago de Chapala), obteniendo la gráfica de inclinación contra tiempo (figura 9). Posteriormente se correlacionó con la inclinación vs profundidad obtenida en el laboratorio, identificando las crestas y valles como se muestra en la figura 9. De la misma manera se hizo para la declinación, observando una muy buena correlación.

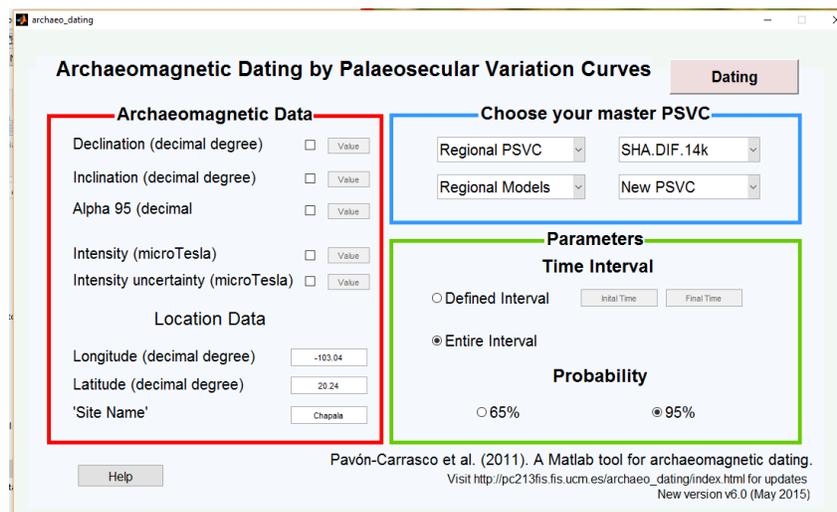


Figura 4.8 Se observan los datos que requiere el programa para obtener las curvas de declinación e inclinación, con mayor grado de importancia los datos de localización. Este es un programa que usa datos de todo el mundo, datos de sedimentos, rocas volcánicas, así como de cerámicas.

## 4.4 Observaciones al microscopio

Debido a que es un trabajo multiproxy, además de los parámetros magnéticos se identificaron diatomeas al largo de todo el perfil para así tener más factores que nos ayudaran a interpretar el ambiente del pasado. Las diatomeas se distinguen fácilmente a nivel de especies y de subespecies basados en características morfológicas únicas.

### 4.4.1 Procesamiento de Diatomeas

El procesamiento de las Diatomeas se realizó en la ENES Morelia en el laboratorio de Química con ayuda del Mtro. en C. Neftalí Razo Pérez y en paralelo con Mtra. en C. Magdalena Velázquez. De manera preliminar se observó el sedimento para clasificar y procesar las muestras con mayor contenido de diatomeas, seleccionando 23 muestras representativas a lo largo del perfil, con lo cual se confirmó que tenían un contenido significativo de estos organismos.

El método de la limpieza de diatomeas es el método propuesto por Gasse en 1980. Se tomó una cantidad pequeña (1g) de muestra y se colocó en un vaso de precipitado de 50 ml. Se agregaron 30 ml de peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$ ) para eliminar el contenido de materia orgánica, se calentó a  $60^\circ C$  para acelerar las reacciones (Figura 3.5a). Posteriormente, cuando la muestra deja de hacer reacción, aproximadamente 5 días después, se le añadieron dos gotas de ácido clorhídrico diluido al 10% para eliminar carbonatos, se calentó para evaporar las soluciones añadidas hasta reducir su volumen.

Una vez reducida (Figura 3.5a), se realizan lavados con agua destilada (Figura 3.5b) hasta que la muestra tenga un pH de 7. Una vez logrado el pH neutro las muestras se colocan en frascos de plástico (Figura 3.5c) donde se pueden guardar por tiempo indefinido para estudios posteriores. Después se toma con una micro-pipeta de precisión (200 ml), se pone a secar en cubre-objetos (Figura 3.5d) por un día y al día siguiente cada muestra se fija en un porta-objetos con Naphrax (®), resina con un alto índice de refracción (1.73).

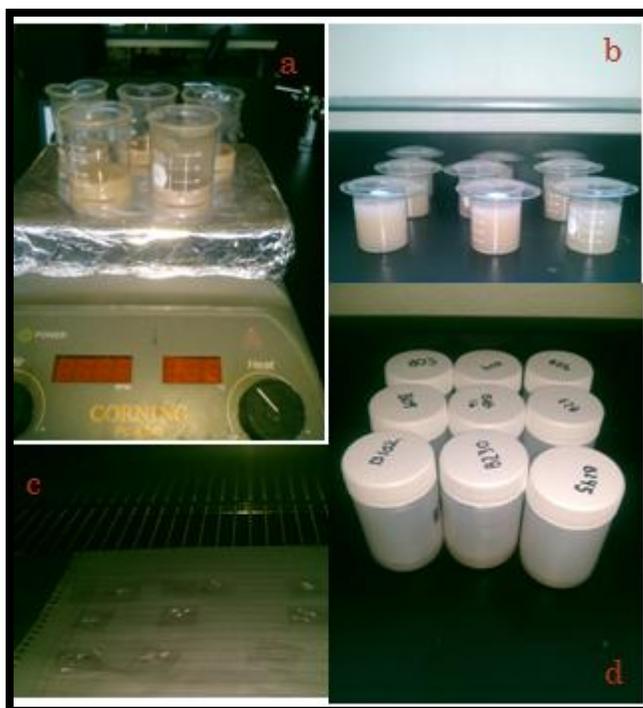


Figura 4.9 Se muestra de manera simplificada el procesamiento de las diatomeas a) Eliminación de la materia orgánica con  $H_2O_2$  siendo calentadas en la parrilla a  $60^{\circ}C$ . b) Muestras dejando asentar para al día siguiente enjuagar (buscando pH neutro), c) Las muestras en el cubre objetos para después fijar y d) muestras preparadas para usos posteriores.

#### 4.4.2 Identificación de Diatomeas

Las diatomeas fueron identificadas utilizando un microscopio Olympus Bymax 50 con cámara digital integrada en la UMSNH en el instituto de Investigaciones Metalúrgicas, departamento de Geología y Mineralogía. La bibliografía especializada utilizada para la clasificación se basó en: Krammer y LangeBertalott 1985, 1986, 1988, 1991<sup>a</sup>, 1991b; Krammer, 1997 Part 1, 1997 Part 2, 2000, 2002, 2003; LangeBertalot y Krammer, 1987, 1993; Lange y Moser, 1994; Lange, 1995, 1996, 1998, 1999, 2000; Patrick y Reimer 1966, Patrick 1977, Round et al., 1992; Wydrzycka y Lange Bertalot, 2001; AlgaeBase y Diatoms of the United States.

## Capítulo V Resultados

### 5.1 Resultados magnéticos

#### 5.1.1 Parámetros dependientes de la concentración

Los parámetros que dependen de la concentración son: la susceptibilidad magnética ( $\kappa$ ), la magnetización remanente anhistérica (MRA) y magnetización remanente isotermal de saturación (MRIS).

#### 5.1.2 Susceptibilidad magnética

El parámetro de la susceptibilidad magnética representa la concentración de minerales magnéticos a lo largo del núcleo.

De manera general, observando el conjunto de parámetros dependientes de la concentración (Figura 5.1), se puede dividir en dos zonas de interés. En la parte superficial se tiene un incremento gradual hasta una profundidad de ~125 cm seguido de un decremento simétrico en la parte más superficial del núcleo hasta 250 cm (Fig. 5.1). Posteriormente se presenta de manera estable hasta los 400 cm aprox.; después presenta poca variación a lo largo de todo el perfil con valores picos en la gráfica de susceptibilidad (5.1a) de  $10.7 \times 10^{-5}$  a la profundidad de ~500 cm,  $12.3 \times 10^{-5}$  a 1250 cm y  $20.6 \times 10^{-5}$  a 2500 cm, que se correlacionan perfectamente con los picos presentes en la gráfica de MRIS (5.1c). Se observó que estos valores máximos corresponden a horizontes oscuros, que probablemente representan depósitos de caída de ceniza volcánica de diferentes episodios volcánicos. Estos valores máximos, anteriormente mencionados, así como el aumento gradual en la sección superior del núcleo, también están presentes en el registro ARM, aunque su presencia es menos notoria debido a la presencia de picos secundarios (figura 5.1b).

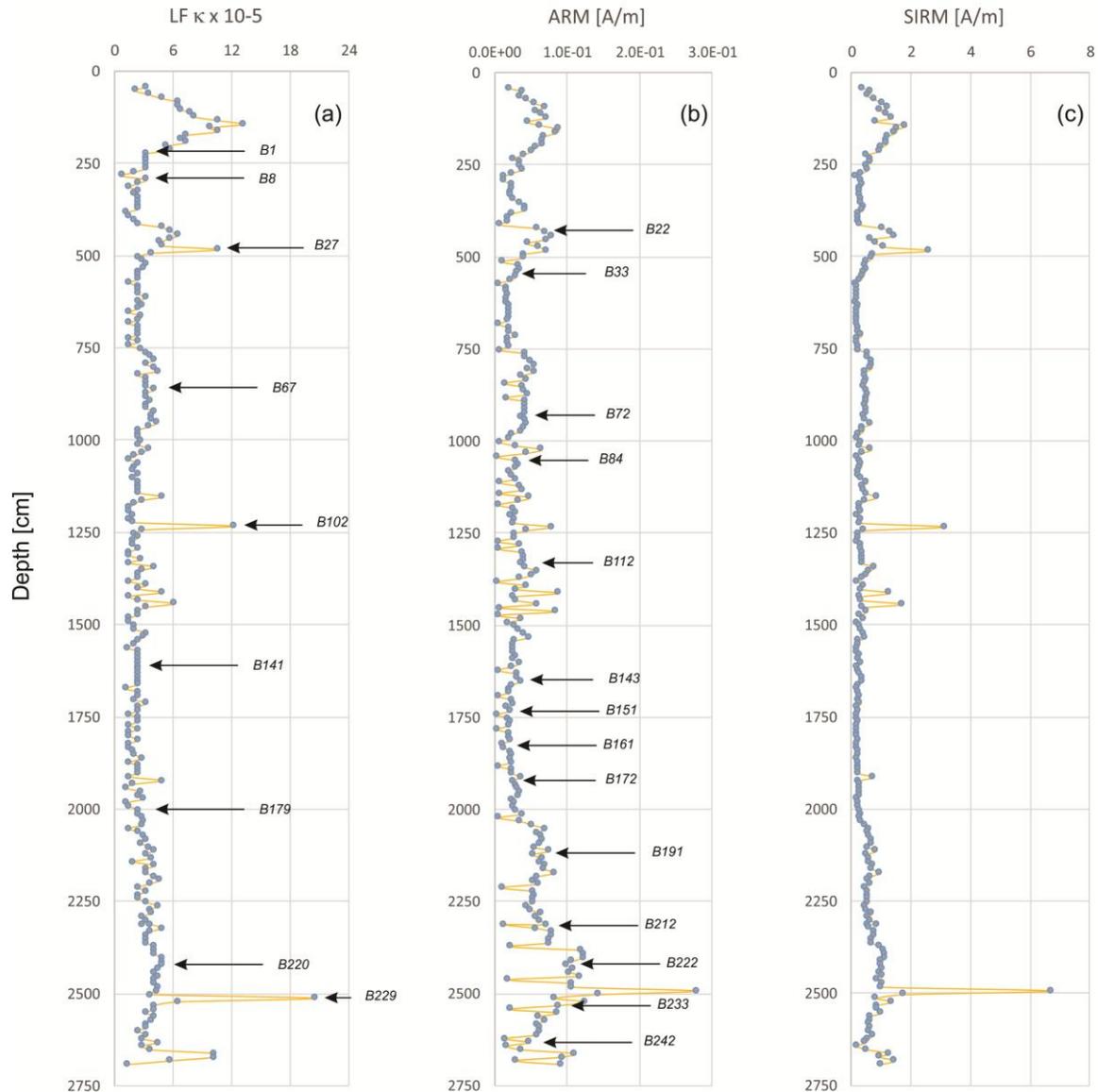


Figura 5.1 Variación de parámetros dependientes de la concentración en función de la profundidad. Se observa que las gráficas se comportan de manera muy similar; los picos indican mayor concentración de minerales magnéticos.

### 5.2.2 Parámetros dependientes del tamaño de grano

Las gráficas de los cocientes  $S_{-25}$ ,  $S_{-300}$  y los cocientes inter-paramétricos (MRA/k, SMRI/k y MRA/SMRI) contra la profundidad nos indican la variación de tamaño de grano magnético a lo largo de todo el perfil (Figura 5.2).

Se observa un tamaño de grano magnético menor en la parte superior del núcleo hasta los 250 cm aproximadamente (figura 5.2a). Posteriormente se observa que el tamaño de grano

aumenta entrando en un ciclo donde aumenta-disminuye llegando a los 1250 cm. Después de esta profundidad se mantienen relativamente estable (Figura 5.2a).

En la Figura 5.2b se observa que la mayoría de los resultados se encuentra entre los valores de 1 o cerca, es decir que los minerales son blandos magnéticamente hablando. Tanto en 5.2a como en 5.2b y 5.2a se ven unos picos sobresalientes un poco antes de llegar a 500cm.

La alta sensibilidad del ARM para identificar los cambios del estado de domino simple (DS) se observa en la figura 5.2c a lo largo de todo el perfil, siendo mayor en la parte más profunda del núcleo 1700 cm-24000 cm.

En la figura 5.2d, de manera general, se observa un mismo tamaño magnético en la parte superior del núcleo, cambiando en la parte final cerca de los 2000 cm. Esta razón también indica la mineralogía magnética que de igual modo cambia en la parte profunda del núcleo.

El cociente ARM/SIRM nos indica el tamaño de dominio magnético (DS, MD) figura 5.2e indica el tamaño de grano de la magnetita. De manera general se observa variación en el tamaño de grano de la magnetita. Es importante remarcar el comportamiento de zigzag de esta gráfica, que en la parte más superficial del núcleo es prácticamente nula.

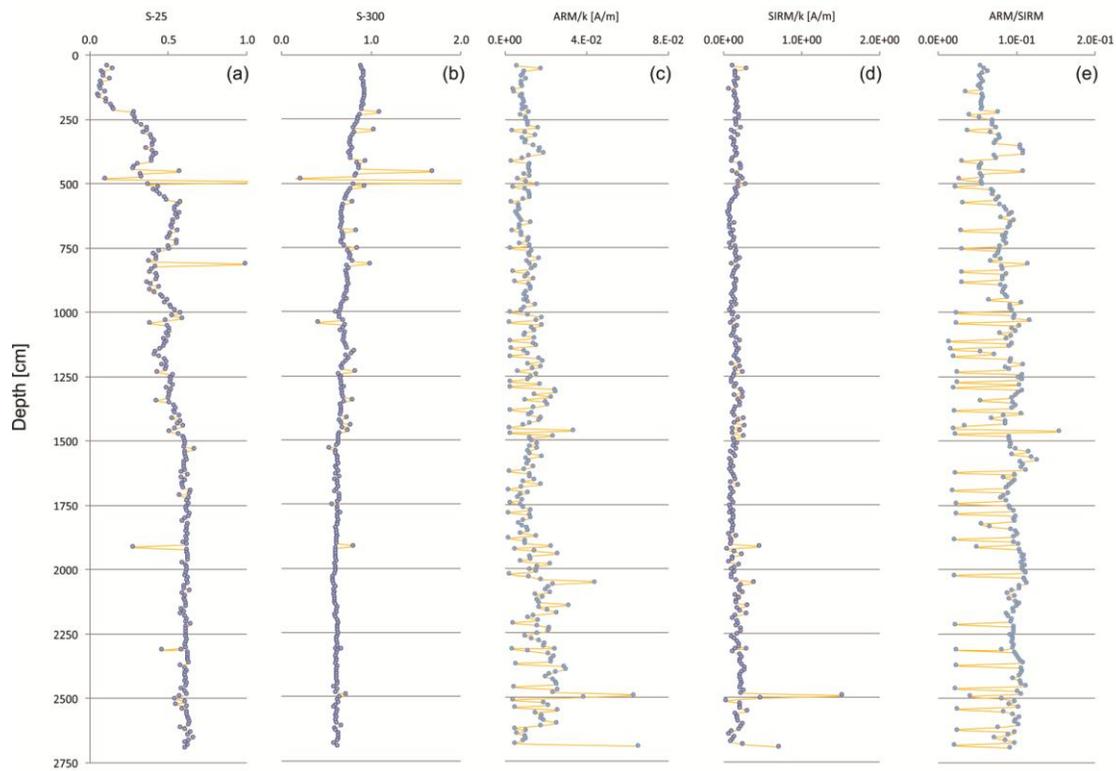


Figura 5.2 Cocientes inter-paramétricos dependientes del tamaño de grano magnético.  $MRA/\kappa$ ,  $MRA/MRIS$  y  $MRIS/\kappa$  aumentan cuando disminuye el tamaño de grano.

### 5.2.3 Ciclo de histéresis y curvas termomagnéticas continuas asociadas

Con la obtención de los ciclos de histéresis se estimó el tamaño de grano de la mineralogía magnética de los sedimentos.

En general, se distinguen dos formas características del tipo “pot-bellied” –cintura de vasija–. El primero de ellos con un aporte significativo de minerales paramagnéticos (figura 5.3a 1), mientras que el segundo (figura 5.3a sample B1, sample B8) de ellos con un aporte menor de minerales paramagnéticos (figura 5.3a sample B27, figura 5.3b sample 102). Otras formas características que se observaron son el tipo “wasp-waisted” –cintura de avispa– (figura 5.3b sample 141, figura 5.3c sample 179) y el tipo “needle-shape” –forma de aguja– (figura 5.3c sample B67), el cual muestra muy poco aporte de los minerales ferromagnéticos (figura 5.3b).

Las curvas termomagnéticas ( $J_s$ - $J$ ) asociadas a los ciclos de histéresis describen tres formas características. La primera es característica de las formas “pot-bellied” (1, con un aporte significativo de minerales paramagnéticos) que presenta baja intensidad de magnetización y una temperatura de Curie de 550°C. Por otra parte, en la segunda forma característica de “pot-bellied” en las curvas termomagnéticas se observa una alta intensidad de magnetización, indicando al menos dos fases de mineralogía ferrimagnética; la más alta con una temperatura de Curie compatible con Titanomagnetita con bajo contenido de Ti.

Las curvas termomagnéticas asociados con las formas de “wasp-waisted” son las más ruidosas, reflejando posiblemente concentración significativamente baja de minerales ferromagnéticos.

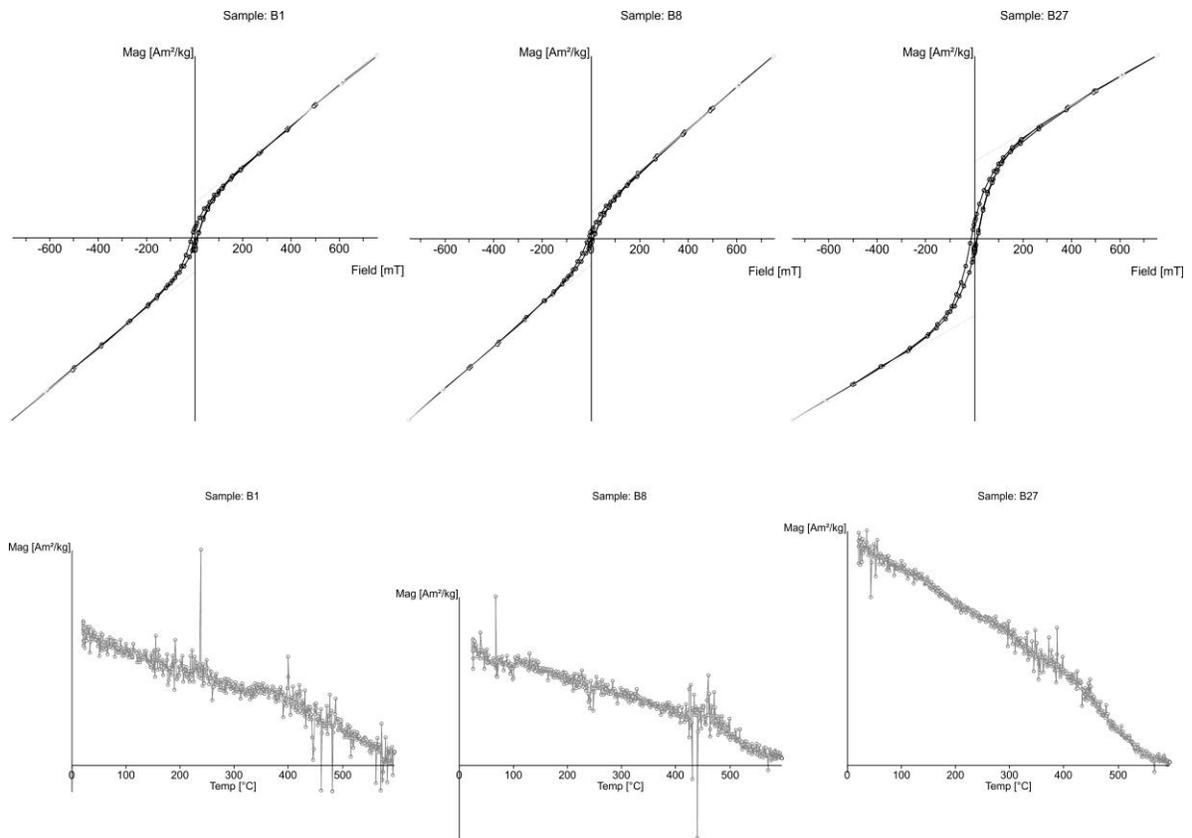


FIGURA 5.3a. Se observan gráficas características del tipo “Pot-bellied”, con curvas termomagnéticas asociadas con baja intensidad y relativamente estables (poco ruido).

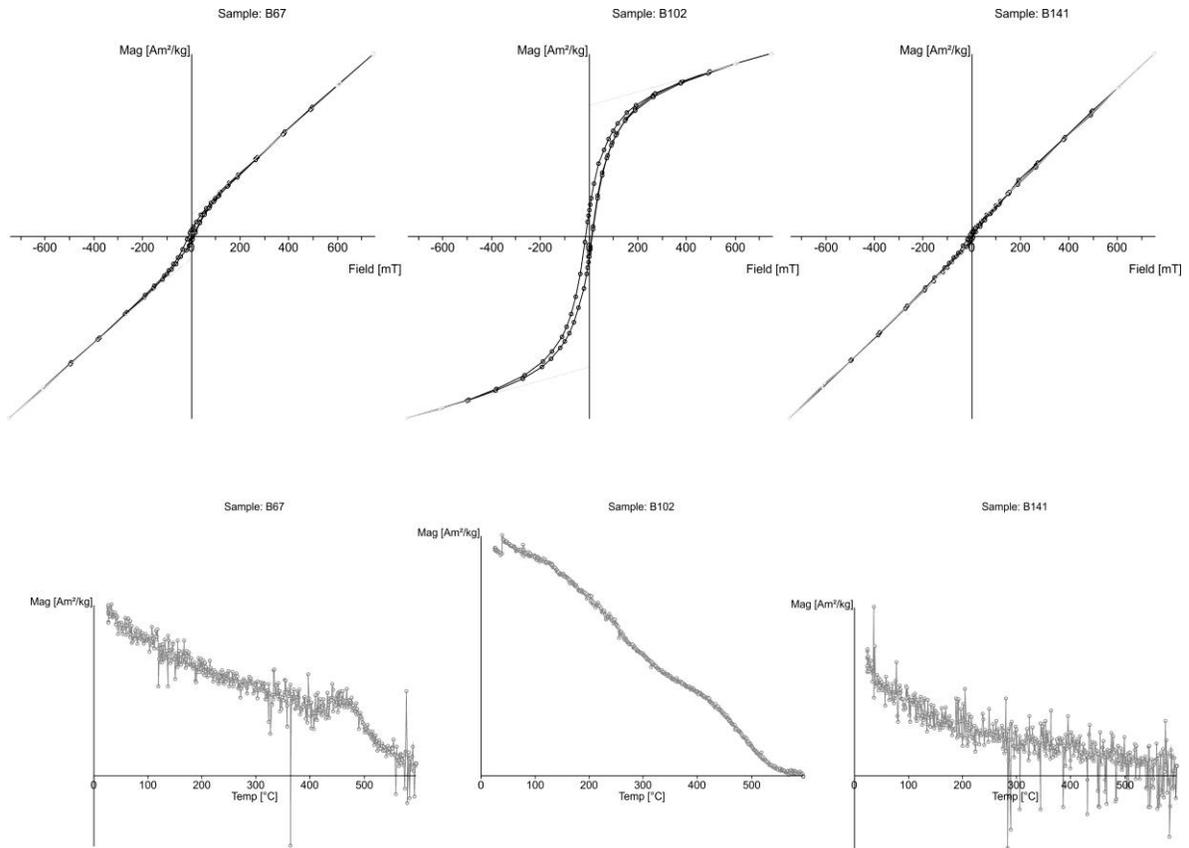


Figura 5.3b. Ciclo de histéresis característico del tipo “needle-shape” de la muestra B67 en la cual se observa un aporte débil de minerales ferromagnéticos. La curva termomagnética asociada es ruidosa debido al aporte de minerales paramagnéticos. La muestra B102 es característica de “pot-bellied” con gran aporte de minerales ferrimagnéticos, con una curva termomagnética estable. La muestra B141 característica de “wasp-waisted”.

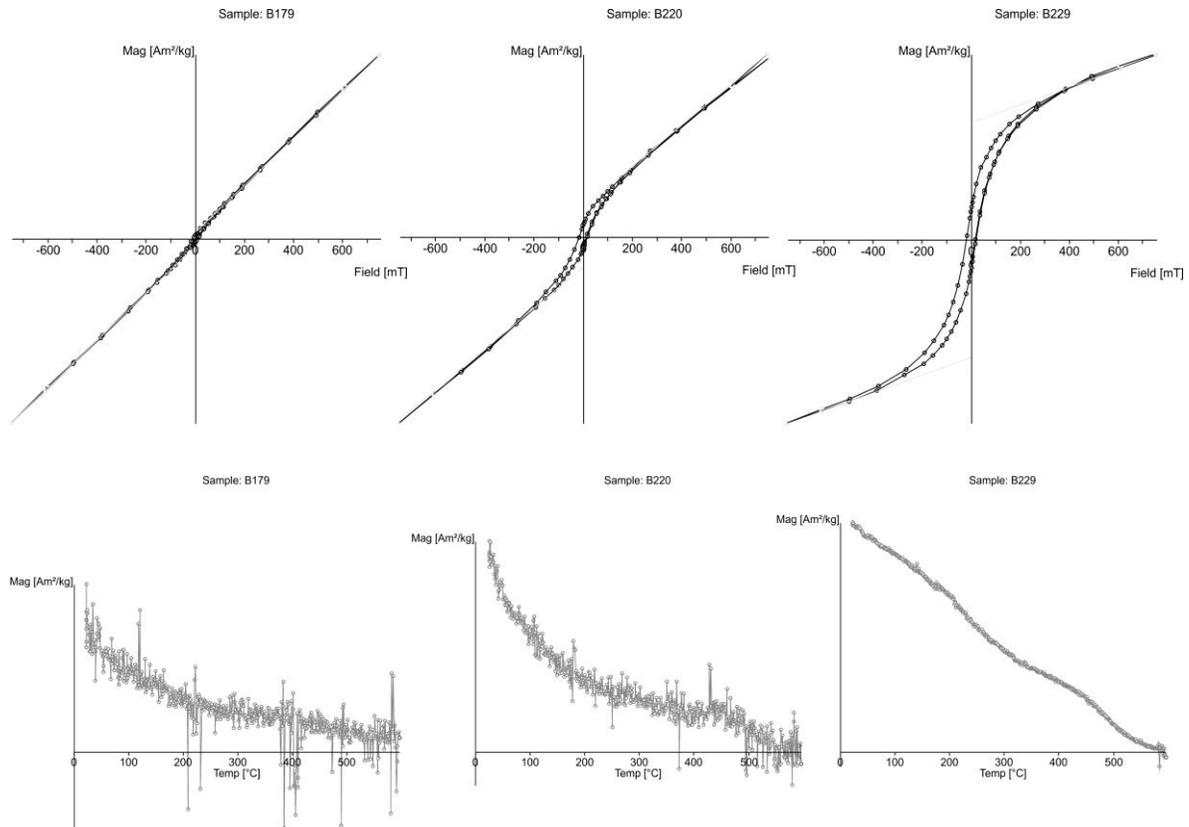


Figura 5.3c. Muestra B179 del tipo “wasp-waisted”, muestra B220 tipo “pot-bellied” con aporte de minerales paramagnéticos, muestra B229 tipo “pot-bellied” con aporte significativo de minerales ferromagnéticos

## 5.3 Propiedades de remanencia

### 5.3.1 Desmagnetización por campos alternos

Al formarse las rocas adquieren una magnetización remanente natural (MRN). Sin embargo, con el tiempo se ven afectadas por procesos que hacen que adquieran magnetizaciones secundarias (alteraciones hidrotermales, rayos). Por lo tanto, la MRN puede constituir más de una componente (primarias y secundarias). En el caso de los sedimentos, su MRN puede estar también conformada por más de una componente: la magnetización detritica primaria y componentes secundarias.

Esta técnica se utiliza para identificar y eliminar las magnetizaciones secundarias de las muestras, para así conocer la magnetización de formación, es decir, la magnetización real cuando fueron depositados los sedimentos, en este caso en particular, conocida como magnetización remanente característica.

Mediante la aplicación de campos alternos se observa el comportamiento de la magnetización remanente vs el campo aplicado. En la figura 5.5 se muestra el resultado de la desmagnetización por campos alternos para un grupo de muestras piloto.

Los resultados de las muestras piloto son los siguientes. En el diagrama Zilderverld se observa una magnetización remanente viscosa (MRV), es decir, una magnetización secundaria y una principal; la primera de éstas es eliminada (magnetización secundaria) entre 15 y 20mT obteniendo la magnetización natural remanente característica (ChNRM figura 5.6a).

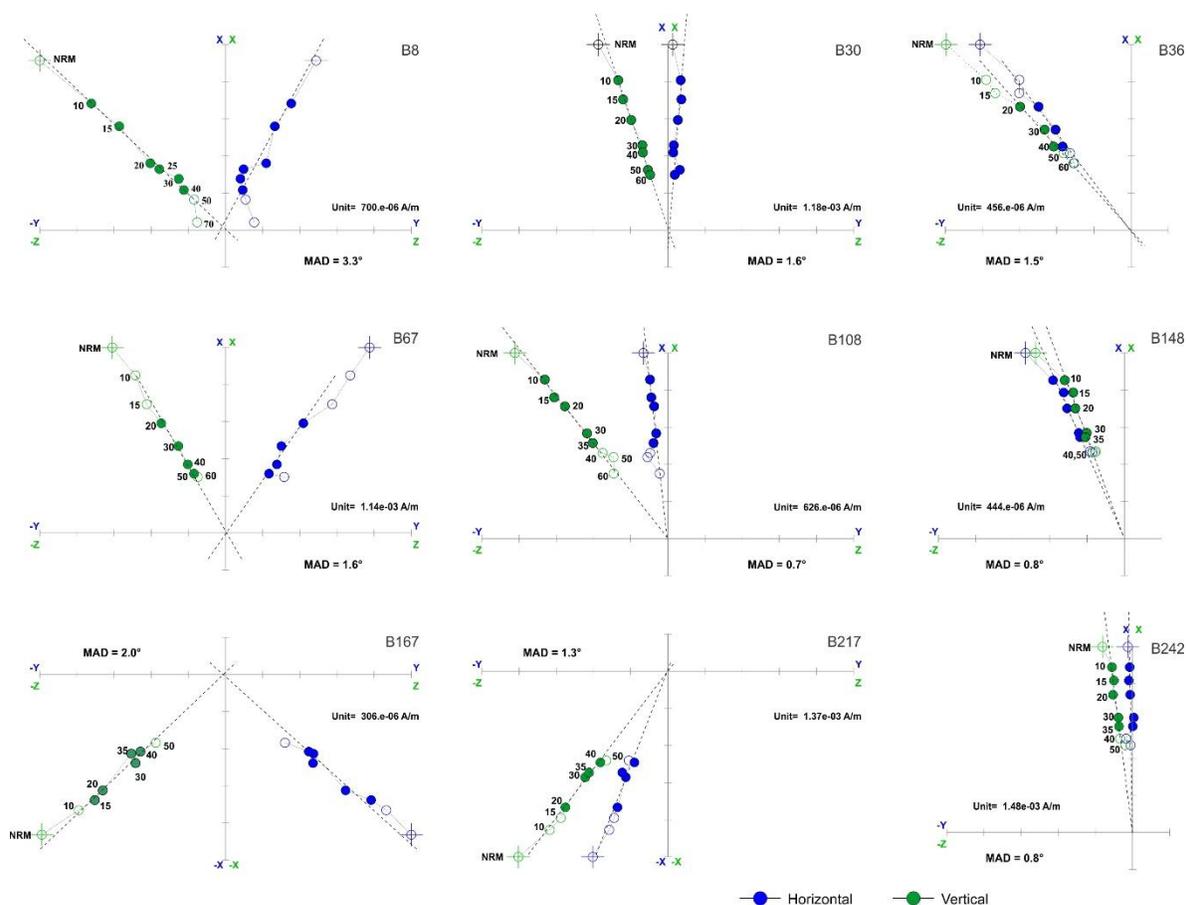


Figura 5.5 diagramas de Zijderveld representativos de algunas muestras pilotos. Cada línea recta que se dirige al origen del diagrama representa la componente de una magnetización característica. Los puntos azules representan la proyección de los vectores magnéticos en el plano horizontal, los puntos verdes en el plano vertical. Los valores están en mT.

A las 217 muestras restantes se le desmagnetizo directamente a 20 mT, obteniendo un registro semi-continuo de la intensidad de la magnetización ChNRM a lo largo de todo el núcleo (figura 5.6). Con un valor medio de  $5.77 \times 10^{-3}$  A/m, este valor junto con el decaimiento gradual de la intensidad durante la desmagnetización AF, sugiere que el tamaño de grano magnético dominante es el dominio simple (SD), misma conclusión obtenida en el diagrama de Day, aunque en la parte superior del núcleo (hasta una profundidad de ~413 cm) y entre 1123 cm y 1223 cm, los valores de campo destructivo medio (MDF) ~18 mT sugieren un tamaño de grano más grande multi-dominio (MD).

Además, las variaciones direccionales (principalmente de la declinación) de la ChNRM aislada son las menos afectadas por las variaciones en la concentración, el tamaño de grano y la mineralogía. Entonces, dichos registros (4.6b y 4.6c) podrían estar relacionados con la variación secular (VS) del campo magnético del pasado, quedando registrado por las partículas magnéticas dentro de los sedimentos lacustres del núcleo. Cabe mencionar que el registro de la declinación se puede ver afectado por perturbaciones mecánicas debido a la extracción del núcleo.

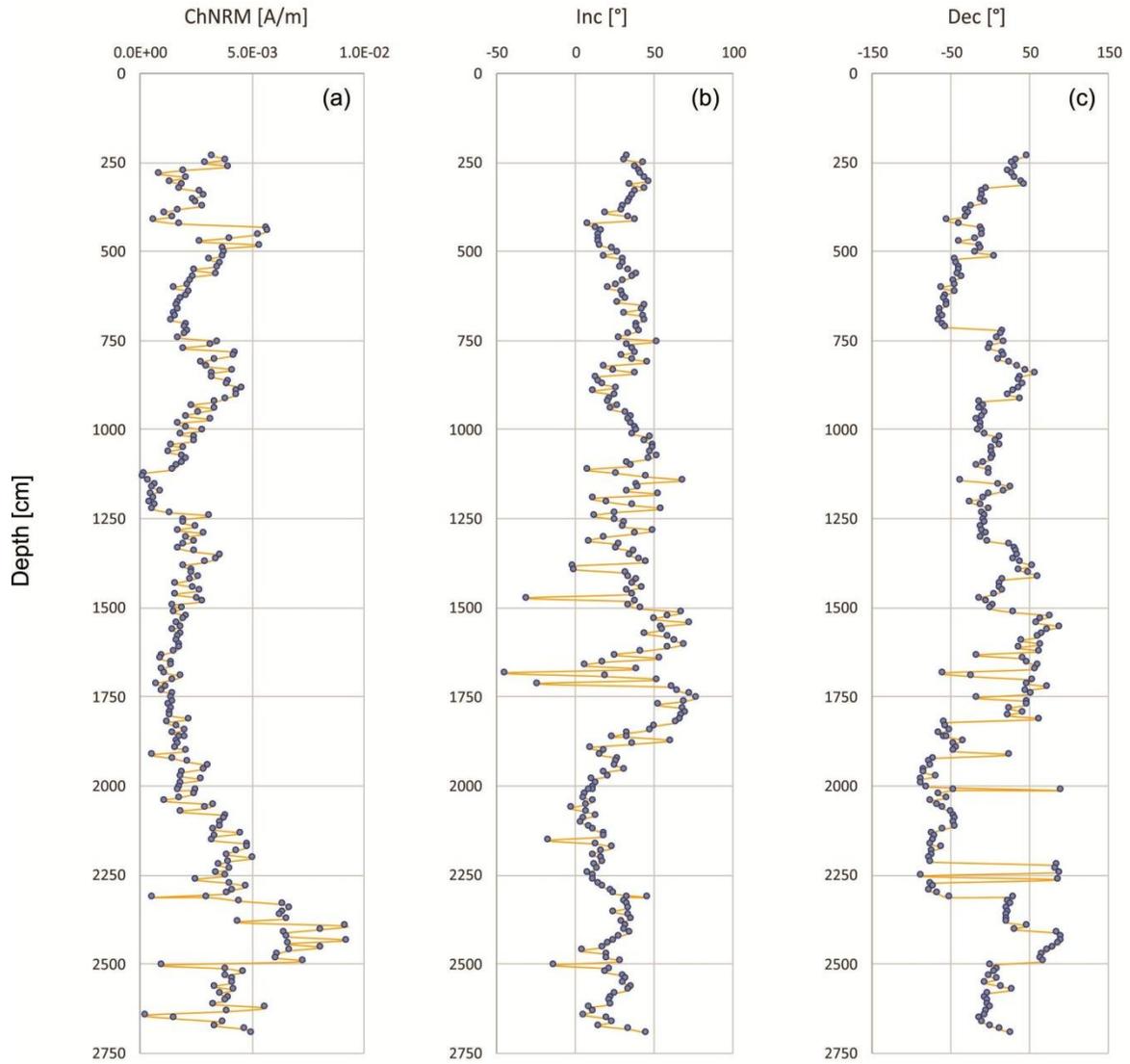


FIGURA 5.6 Se observa la variación en la intensidad de la Magnetización Natural Remanente característica, así como de la declinación e inclinación con respecto a la profundidad.

## 5.4 Tasa de sedimentación

Se tuvo la idea de determinar la tasa de sedimentación de forma alternativa, sin llegar a métodos tradicionales como son los fechamientos por  $^{14}\text{C}$ . Por tal motivo, se utilizaron los datos de inclinación y declinación obtenidos en el laboratorio y los calculados en el programa `archaeo_dating` (explicado en la metodología) poniendo el lugar geográfico; obteniendo la gráfica de inclinación contra tiempo y posteriormente declinación; comparando ambas gráficas como se muestra en las figuras 5.8 y 5.9, mismas que muestran correlaciones evidentes.

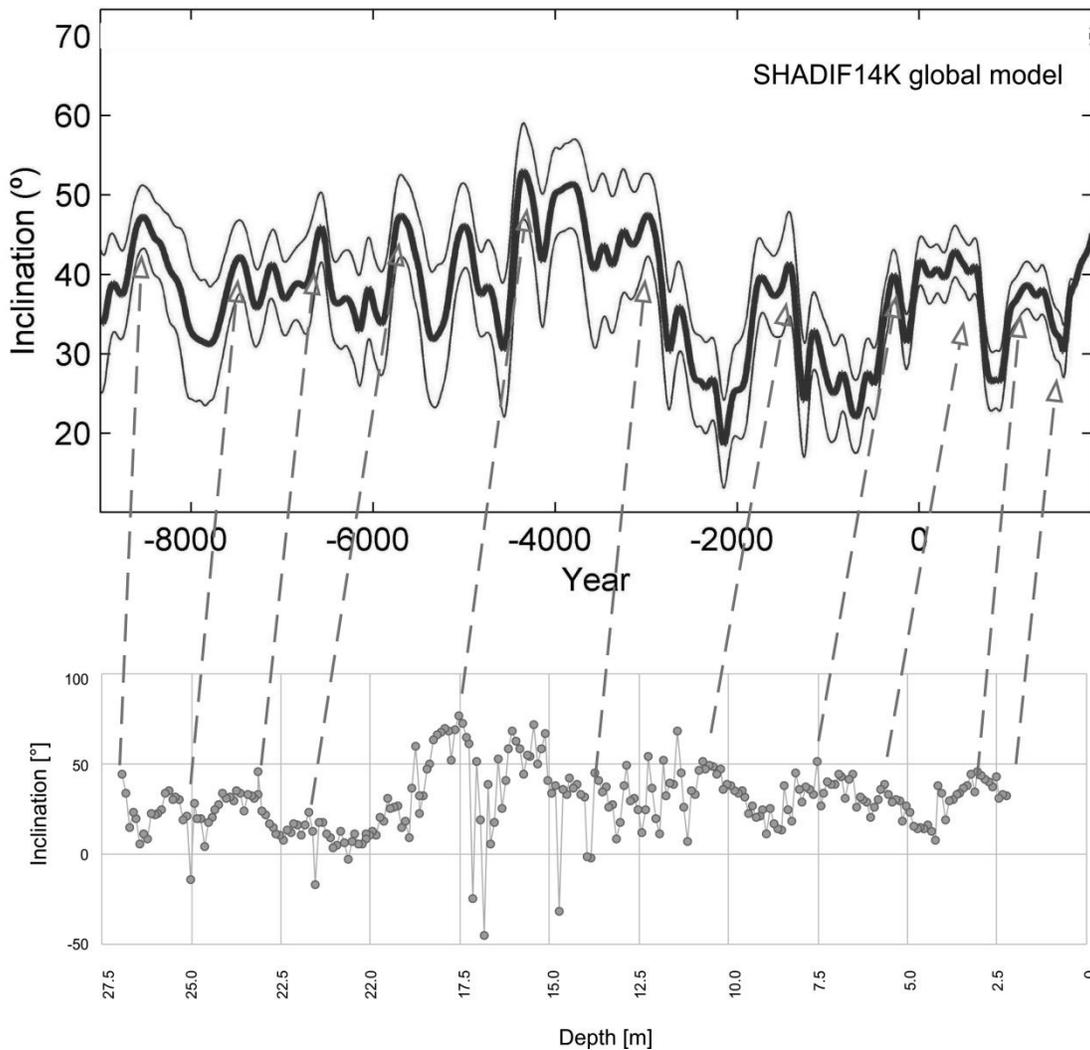


FIGURA 5.8 Correlación del modelo obtenido en `archaeo_dating` (inclinación) con los datos obtenidos en el laboratorio (inclinación).

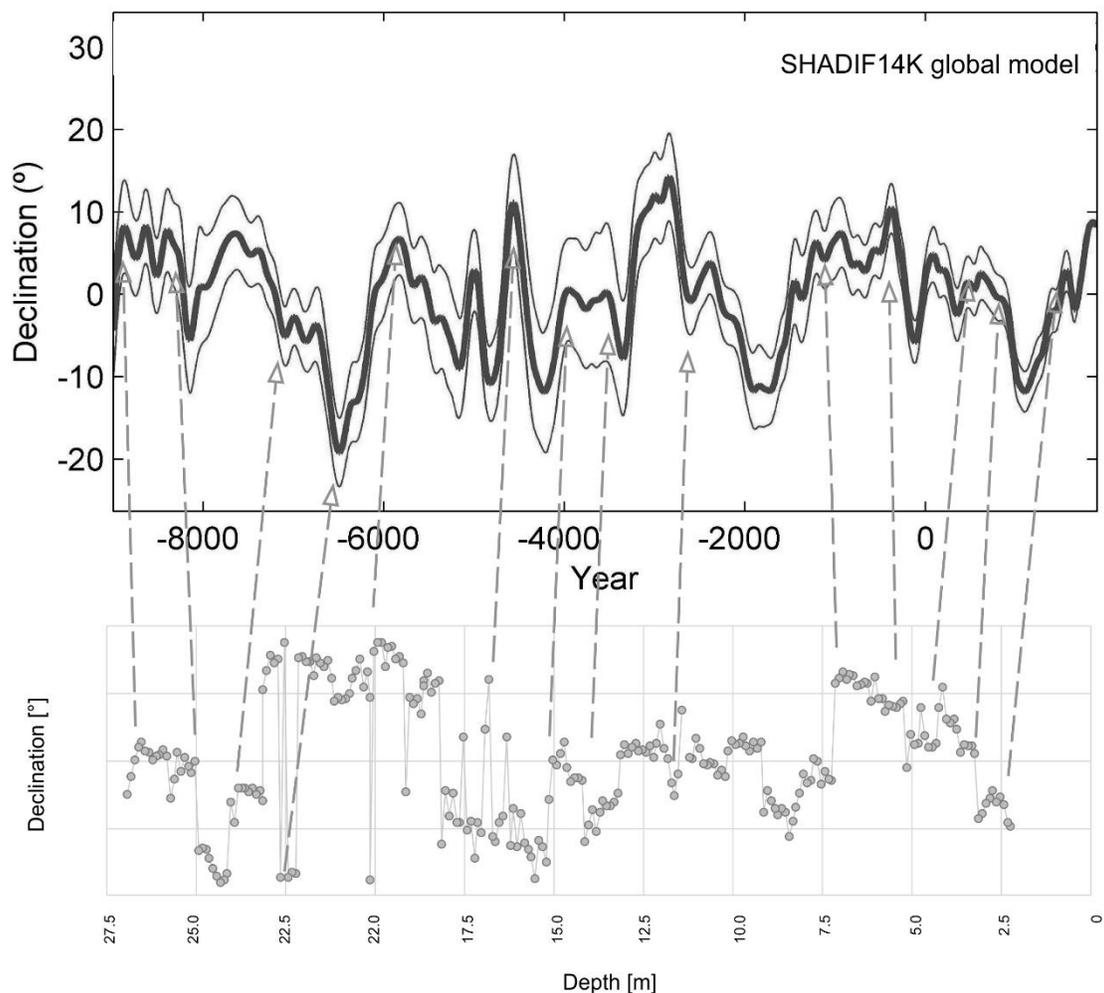


FIGURA 5.9 Correlación del modelo obtenido en `archaeo_dating`, implementado en Matlab (Declinación) con los datos obtenidos en el laboratorio (Declinación).

A partir de las gráficas de las figuras 5.8 y 5.9 se obtuvieron rangos de profundidad en una, mientras que, con la otra, los rangos de tiempo. Gracias a esto se calculó la tasa de sedimentación mostrada en la figura 5.10. Se observan tres rangos que van desde 1.6-2 mm/año de 10ka a los 4ka AP, después se observa la tasa de sedimentación mayor a lo largo de todo el perfil con 2.8mm/año hace 4ka AP hasta el presente, y finalmente tenemos un rango de sedimentación de 2.5 a 2 mm/ en estos últimos 2000 años. Las tasas de sedimentación determinadas por paleomagnetismo corroboran las tasas de sedimentación reportadas por Fernex et al., 2001 para el sedimento somero del lago de Chapala.

Por lo anteriormente descrito, es evidente que pasó algo importante entre -4000 años y -100 años aproximadamente, ya que la tasa de sedimentación aumenta, indicando muy

probablemente un aumento en las lluvias, por lo tanto, mayor grado de erosión de la cuenca; esto hizo que hubiese mayor depósito de sedimento. Cabe mencionar que es una gráfica muy generalizada.

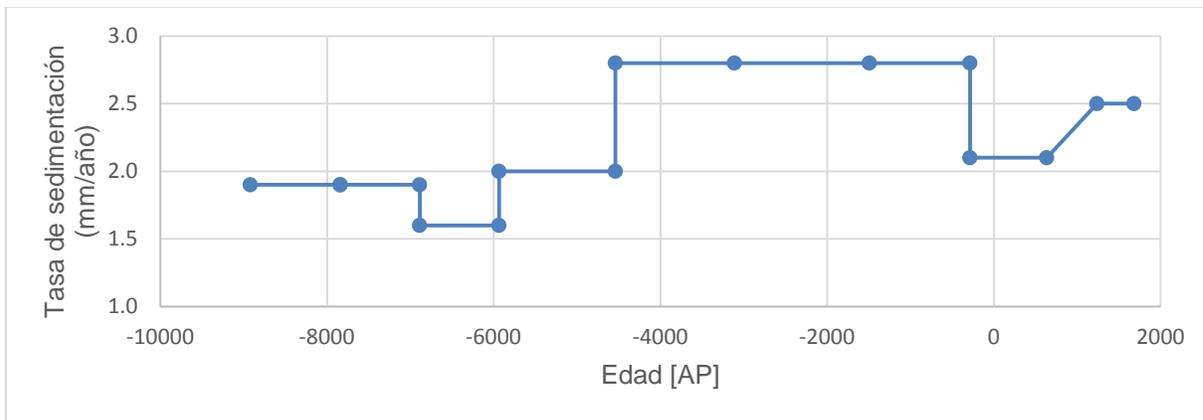


FIGURA 5.10 Gráfica que muestra la tasa de sedimentación. Tasa de sedimentación (mm/año) vs tiempo (años).

## 5.5 Resultados Diatomeas

Descripción general de las especies de diatomeas más representativas del núcleo CHD-B de 27 metros de profundidad.

*Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979

Clase *COSCINODISCOPHYCEAE*

Orden *AULACOSEIRALES*

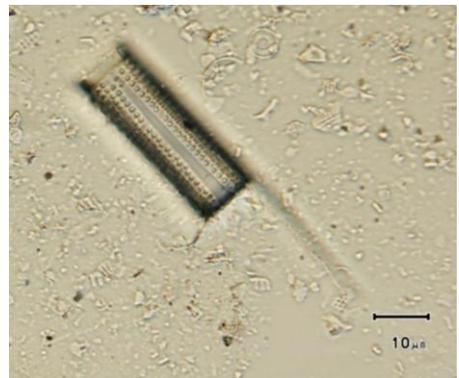
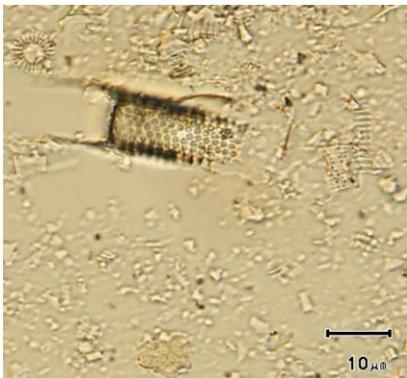
Familia *Aulacoseiraceae*

Género *Aulacoseira*

Especie *Aulacoseira granulata*

Descripción: Los frústulos son cilíndricos, se unen cara a cara para formar colonias filamentosas. Las valvas tienen un diámetro de 4-17  $\mu\text{m}$ , con una altura de 4-20  $\mu\text{m}$ . Las estrías son espirales o rectas en la capa valvar. Termina en células juntos con pequeñas espinas. Las espinas de enlace son cortas, triangulares o bifurcadas, se distinguen fácilmente por la presencia de una o dos espinas.

Ecología: especie planctónica de agua dulce, se puede encontrar cerca de las orillas de agua lenta y lagos, sobre todo en aguas eutrofizadas; viven en aguas poco profundas y aguas turbias.



**Clase *MEDIOPHYCEAE***

*Cyclotella meneghiniana* Kützing 1844

Clase *MEDIOPHYCEAE*

Orden *STEPHANODISCALES*

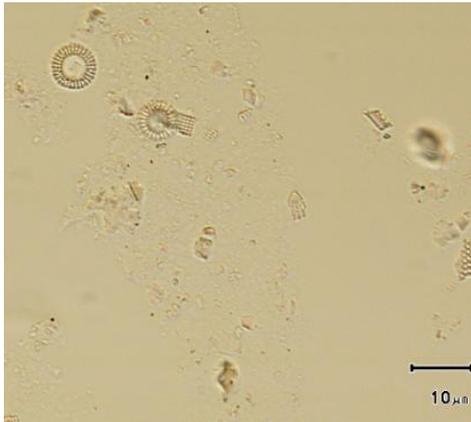
Familia *Stephanodiscaceae*

Género *Cyclotella*

Especie *Cyclotella meneghiniana*

Descripción: Mide entre 6-18  $\mu\text{m}$  de diámetro. Es una especie central, planctónica, sin rafe ni pseudorrafe; a menudo con aspecto circular o cilíndrico.

Ecología: se pueden encontrar en aguas dulces, ambiente lénticos y lóticos de todo el planeta, aunque también se pueden encontrar en aguas salobres e incluso ambientes marinos.



*Stephanodiscus niagarae* Ehrenberg 1845

Clase *MEDIOPHYCEAE*

Orden *STEPHANODISCALES*

Familia *Stephanodiscaceae*

Género *Stephanodiscus*

Especie *Stephanodiscus niagarae*

Descripción: especie central, de diámetro de 21-70  $\mu\text{m}$ , planctónica, las estrías son radiales separadas por hialinas elevadas.

Valva circular con el centro ligeramente cóncavo o convexo ya que la valva está concéntricamente ondulada. Estrías radiales aeroladas en fascículos muy cercanos entre sí, interespaciados sólo por áreas hialinas. De 5 a 7 fascículos en 10  $\mu\text{m}$  y de 15 a 19 areolas en 10  $\mu\text{m}$ .

Ecología: planctónica de aguas mesotróficas a hipereutróficas (Krammer & Lange-Bertalot, 1991).



*Stephanodiscus medius* Håkansson 1986

Clase *MEDIOPHYCEAE*

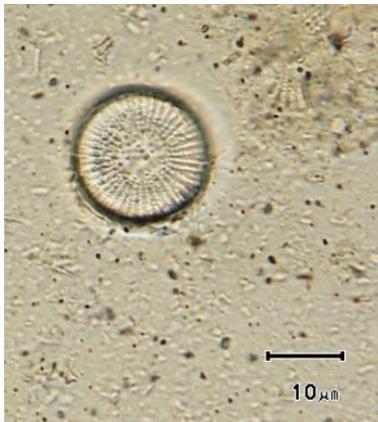
Orden *STEPHANODISCALES*

Familia *Stephanodiscaceae*

Género *Stephanodiscus*

Especie *Stephanodiscus medius*

Son especies centrales, organismos eurihalobio (soporta variaciones), ologohalobio, alcalibionte. Son organismos planctónicos de largo 6-32 µm.



*Stephanodiscus nemanensis* Khursevich

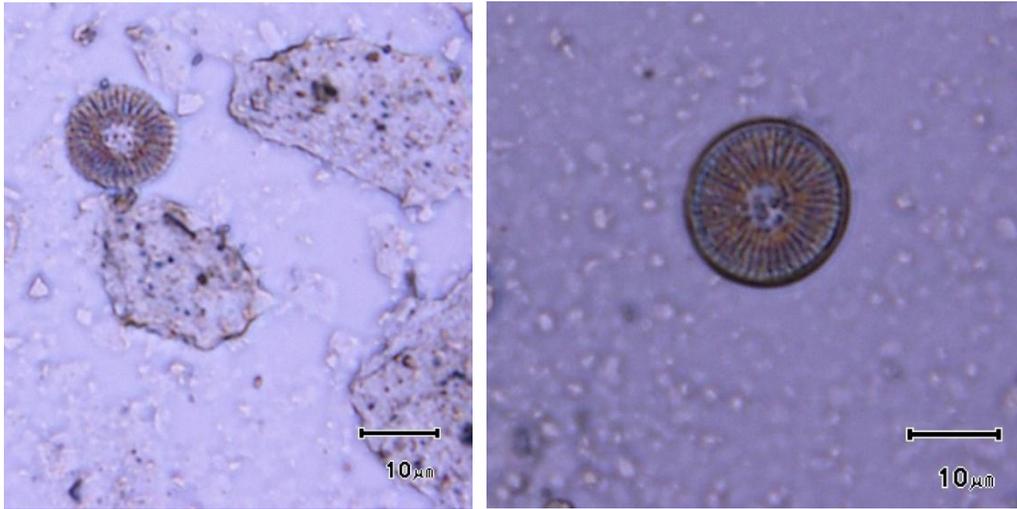
Clase *MEDIOPHYCEAE*

Orden *STEPHANODISCALES*

Familia *Stephanodiscaceae*

Género *Stephanodiscus*

Especie *Stephanodiscus nemanensis*



*Stephanodiscus minutulus* (Kützing) Cleve & Möller 1882

Clase *MEDIOPHYCEAE*

Orden *STEPHANODISCALES*

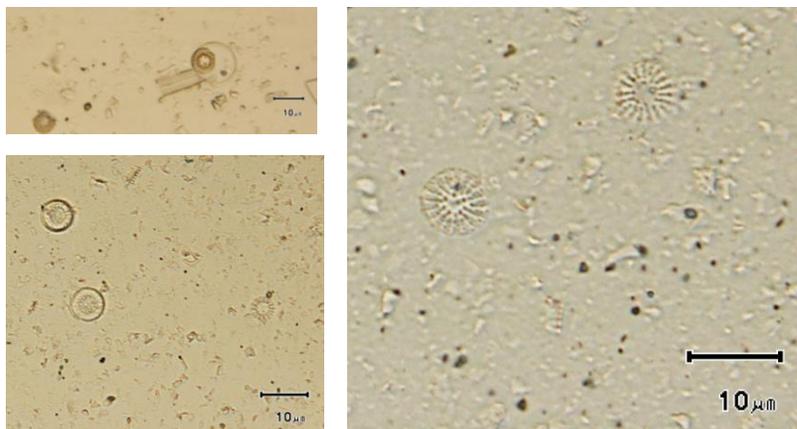
Familia *Stephanodiscaceae*

Género *Stephanodiscus*

Especie *Stephanodiscus minutulus*

Especie central. Valvas circulares que miden de 6-12 µm de diámetro, con una marcada elevación o depresión en la parte central. Estrías biseriadas (algunas veces triseriadas) llegando a ser uniseriadas en el centro.

Ecología: organismos planctónicos, forma de vida cosmopolita.



**Clase *BACILLARIOPHYCEAE***

*Synedra ulna* Østrup 1901

Clase *BACILLARIOPHYCEAE*

Orden *FRAGILARIALES*

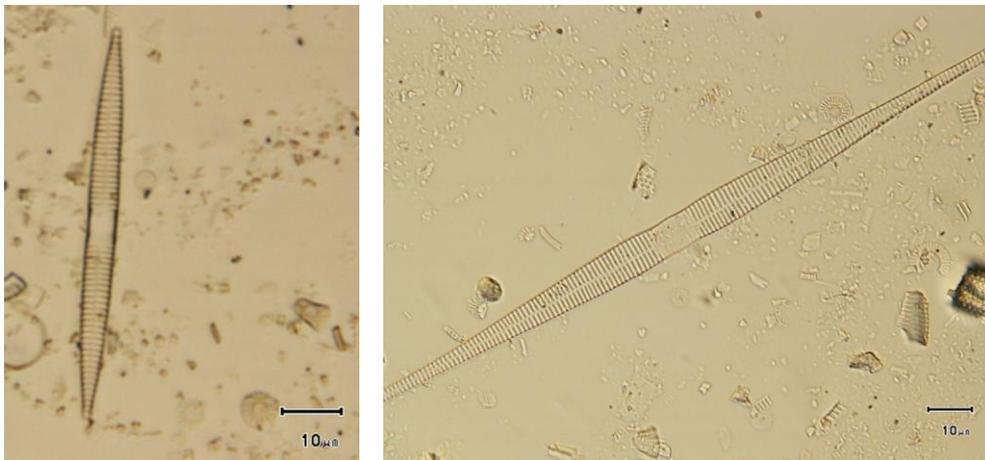
Familia *Fragilariaceae*

Género *Synedra*

Especie *Synedra ulna*

Descripción: especie penal, las valvas son alargadas y lineales con estrías casi paralelas y dispuestas una frente a la otra, pero en los polos las estrías se empiezan a curvar y se alternan entre sí, tiene un área central rectangular con estrías fantasmas. Mide de 65-149  $\mu\text{m}$  de largo y 6.5-6.8  $\mu\text{m}$  de ancho.

Ecología: especie bentónica



*Cocconeis placentula* Ehrenberg 1838

Clase *BACILLARIOPHYCEAE*

Orden *COCCONOIDALES*

Familia *Cocconeidaceae*

Género *Cocconeis*

Especie *Cocconeis placentula*

Descripción: las valvas son elípticas a lineales-elípticas y relativamente planas, el rafe es recto y tiene un área axial estrecha, lineal con un área central oval o circular pequeña. Las estrías son finas, casi paralelas en el centro y se irradian hacia los polos que se interrumpen por un anillo hialino situado cerca del margen de la válvula.

Las estrías están formadas por puntos casi isodiamétricos. Con un largo de 9-68  $\mu\text{m}$  y un ancho de 7-32  $\mu\text{m}$ .

Ecología: es una especie bentónica se encuentran en casi todas las aguas dulces donde el pH es neutro a alcalino, también se encuentra en aguas salobres.





## 5.6 Correlación de parámetros magnéticos-Diatomeas

La correlación de las poblaciones de diatomeas con la tasa de sedimentación define al núcleo en tres zonas (Figura 5.11):

**Zona 1.** La zona que corresponde a la base del núcleo (27-18 m), es decir, los sedimentos más antiguos analizados, muestra una mezcla de especies planctónicas y bentónicas. No obstante, las especies dominantes *Aulacoseira granulata* y *Stephanodiscus nemanensis* indican un ambiente de aguas profundas y turbias, lo que confirma lo reportado en publicaciones previas (Israde Alcantara et al., 2015, Espinoza-Encinas et al., 2016). Esto último se reafirma y correlaciona con el análisis de sedimentación que para la misma zona indica una tasa de sedimentación inestable que oscila entre 1.5 a 2 mm/año, posiblemente con intervalos de lluvias moderadas a fuertes, generando un lago abierto con aporte tanto de agua como de sedimento de manera constante. (Ramírez et al., 2007).

**Zona 2.** Entre los 7.5 y los 18 m de profundidad se observa una tasa de sedimentación muy estable, además de alta (3mm/año); la mayor sedimentación a lo largo de todo el núcleo. Se identificaron solo especies planctónicas, como la *Stephanodiscus minutulus*, *S. nemanensis* y *Aulacoseria granulata*, que nos indica aguas turbias y profundas (Reavie et al., 2000). Se puede decir que en ese periodo hubo lluvias más intensas que incrementaron el nivel del agua y el grado de depósito de sedimentos que mantuvieron la turbidez del lago. La escasez de especies bentónicas se puede justificar por el hecho de que estuviese muy perturbado por el depósito de los sedimentos, además con tamaños no uniforme (como se muestra en la figura 2), evitando así la estabilidad de las diatomeas bentónicas. Así como las lluvias intensas aumentaron el tirante de agua proliferando las especies bentónicas.

**Zona 3.** Hacia la cima del núcleo la tasa de sedimentación disminuye, disminuyendo la tasa de erosión y vuelve a aumentar en la parte reciente (2-2.5mm/año), mientras que las poblaciones de las diatomeas, específicamente *Stephanodiscus minutulus* y *Stephanodiscus nemanensis* indican un cuerpo de agua predominante (o relativamente) profundo, con aumento en la salinidad (Ramírez et al., 2007).

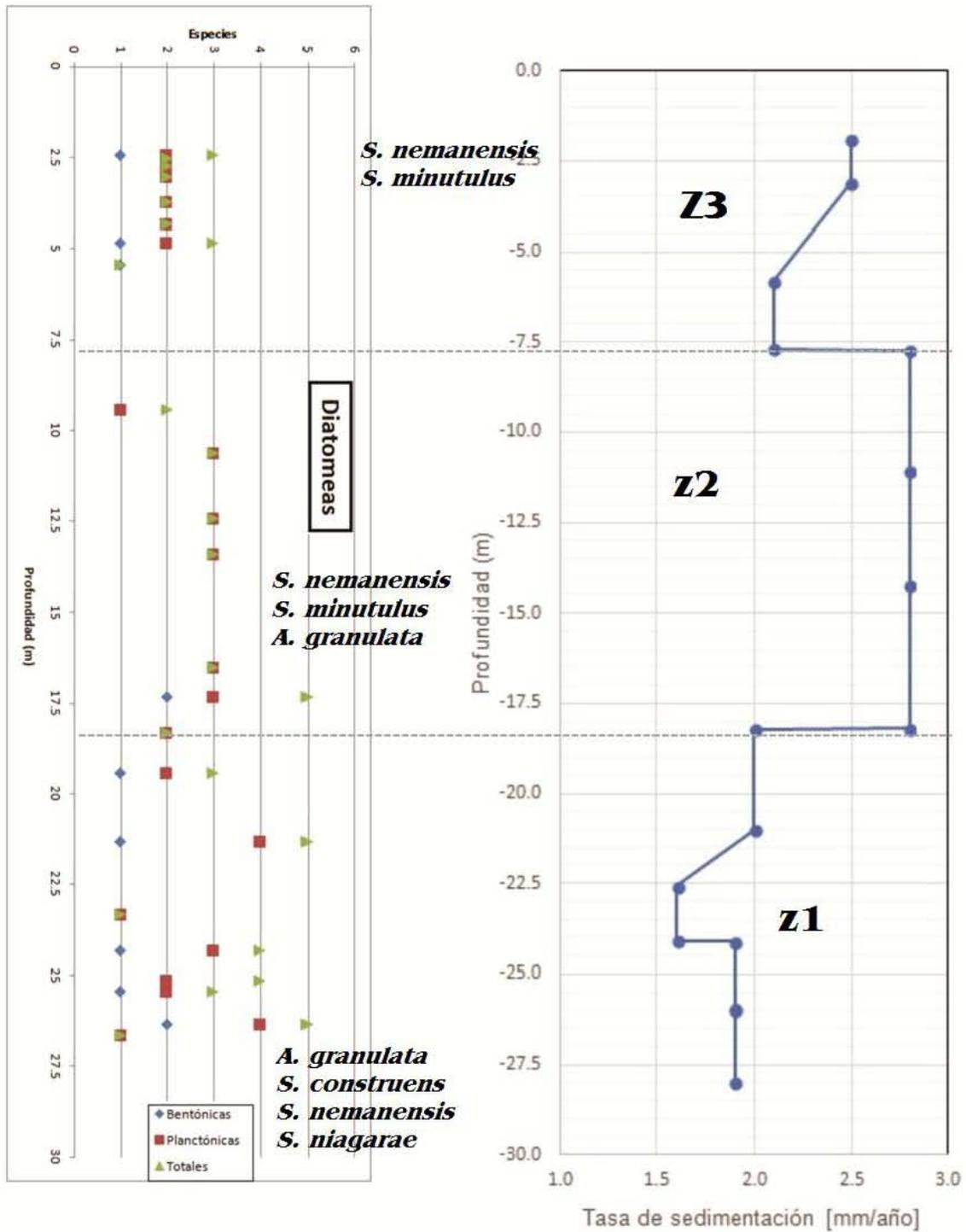


Figura 5.11 En la parte izquierda se muestra el número de especies de diatomeas presentes en el núcleo graficadas contra la profundidad. Las diatomeas están diferenciadas entre especies bentónicas y planctónicas, y la suma de ambas especies (bentónicas y planctónicas) que son las totales. Se indica en cada zona las especies dominantes, en la parte derecha se muestra la gráfica de la tasa de sedimentación contra tiempo.

### 5.6.1 Diatomeas contra parámetros dependientes de la concentración

De igual forma que, en la figura anterior, en esta correlación se identifican tres zonas:

Zona 1. En esta zona (Figura 5.12), en algunas partes aumenta la concentración de la mineralogía magnética, pero en otras disminuye ( $0 - 3e^{-1}$  A/m) indicando variabilidad en el cuerpo de agua; es decir, aumento-disminución del depósito de material. En ésta coexisten ambos tipos de diatomeas –bentónicas y planctónicas- lo que indica un ambiente cambiante, predominantemente profundo, indicado por la dominancia de especies planctónicas. Cabe resaltar que, en esta zona –el periodo más antiguo del núcleo perforado–, se tiene la mayor concentración de especies; es decir, comparado con las otras zonas, en ésta se encontraron cerca de 30 especies distintas.

Zona 2. En esta zona se observan cambios notables y más significativos que en la zona 1. Es de esperarse, ya que, como se ha mencionado anteriormente, en esta zona se encuentra la mayor tasa de sedimentación. Corresponde, probablemente, a un periodo de lluvias intensas que provocaron el aumento en el nivel del agua y mayor erosión; con lo que se generó mayor sedimentación y el arrastre de minerales magnéticos que no afectaron la proliferación de las especies planctónicas.

Zona 3. En esta zona se identifican cambios evidentes en la concentración de la mineralogía magnética, pero son cambios lentos y progresivos, a diferencia de los que se observan en las zonas anteriores. Las diatomeas son tanto especies bentónicas como planctónicas, lo cual sugiere que, aunque dominan las especies planctónicas, pudo haber disminución el nivel del agua que, además con la variación en la concentración de la mineralogía, permitió la producción de las especies bentónicas.

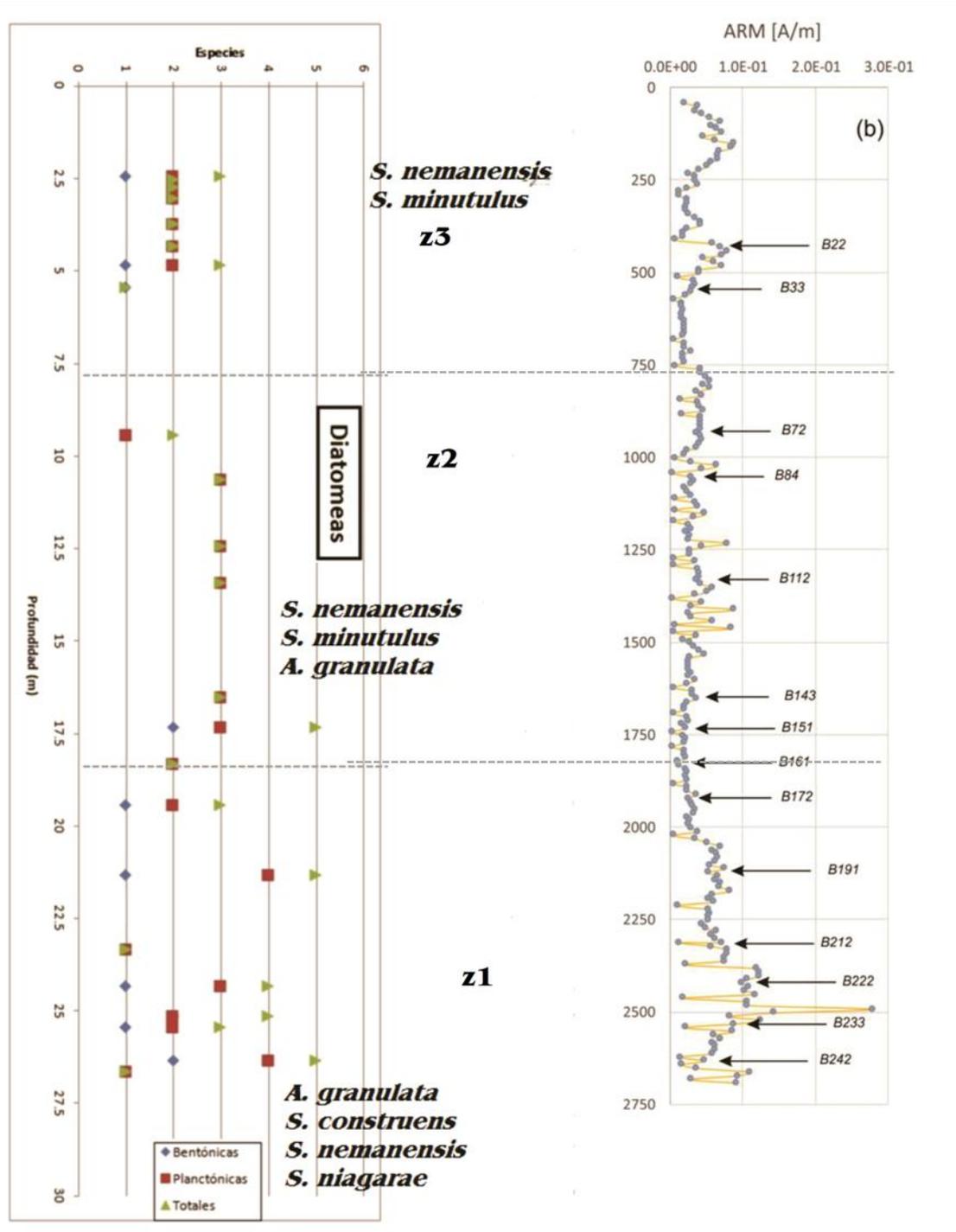


Figura 5.12 Correlación entre el contenido de diatomeas representativas, parte izquierda, y la magnetización remanente anhistrérica (MRA) (que depende de la concentración), parte derecha.

### 5.6.2 Parámetros magnéticos dependientes del tamaño de grano con el contenido de las diatomeas

Zona 1. En la parte más antigua del núcleo se observa gran variación en el tamaño de grano, indicando un lago en el cual en este periodo tuvieron lugar lluvias intensas, permitiendo la proliferación de especies como *Aulacoseira granulata*, que es típica de lagos con aguas turbias y profundas. No obstante, el nivel del agua permite la producción de especies bentónicas que coexisten con las especies planctónicas dominantes.

Zona 2. Se observa variación en el tamaño de grano, lo que indica un ambiente más dinámico, es decir con mayores lluvias, mayor erosión, en las cuales se sedimentaban todo tipo de minerales y diferentes tamaños de grano. Es importante resaltar que en esta zona solo se encontraron especies planctónicas que reafirman un aumento en el tirante de agua.

Zona 3. Se muestra poca variación en el tamaño de grano, correlacionando con la interpretación de las concentraciones de las diatomeas. Se entiende que la parte más reciente del núcleo sugiere disminución en el nivel del agua y un lago relativamente tranquilo con diatomeas bentónicas y planctónicas.

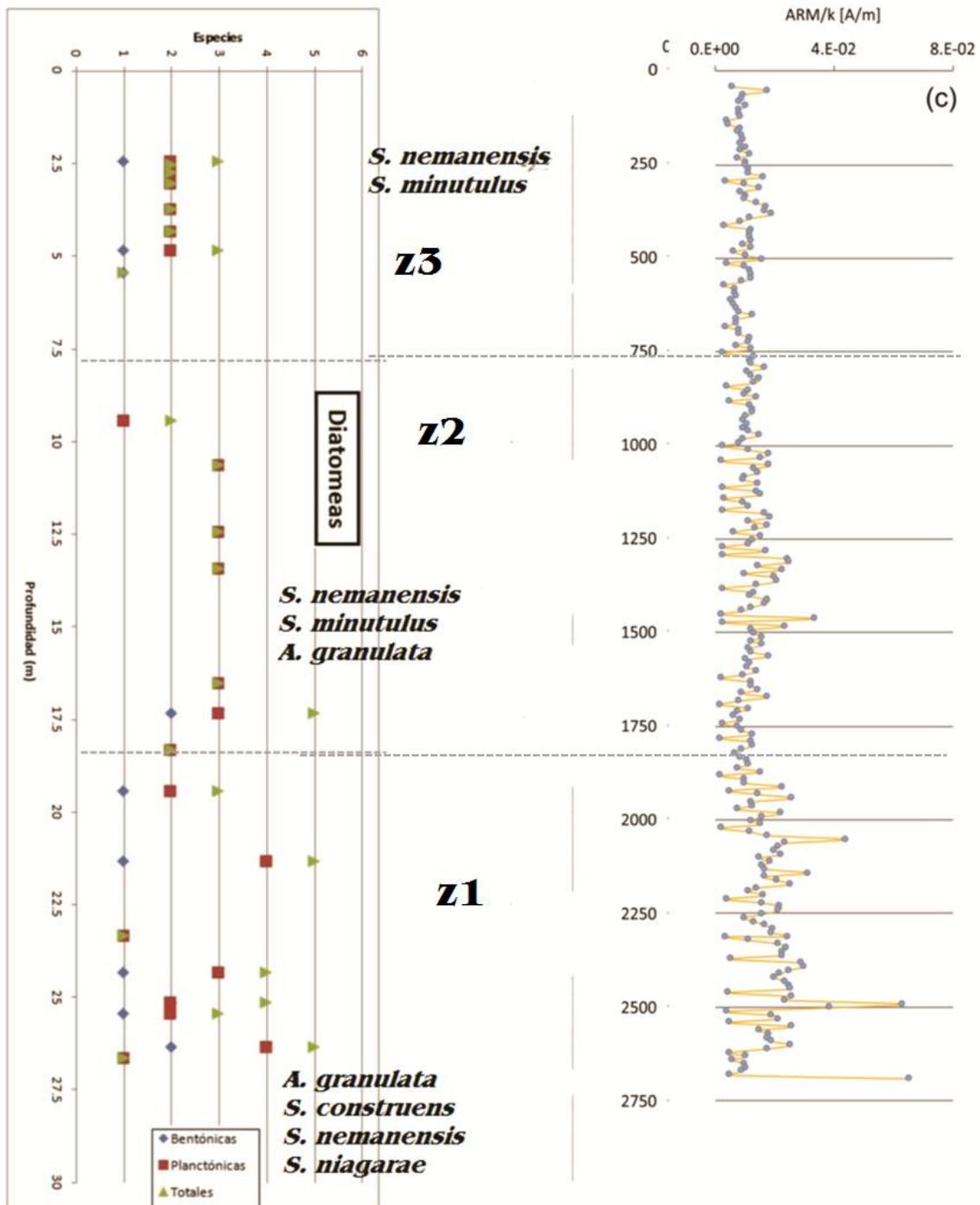


Figura 5.13 Se observan las gráficas de ARM/k y su relación con el contenido de las diatomeas, ambos contra la profundidad. El cociente entre los parámetros magnéticos ARM/k (magnetización remanente anhística entre la susceptibilidad) representa el tamaño de grano magnético.

## Capítulo VI

### 6.1 Discusión

La mineralogía magnética asociada a la forma *pot-believed* del tipo 1 parece estar distribuida a lo largo de todo el núcleo, mientras que las de tipo 2 se encuentran en los picos de la susceptibilidad. Por otro lado, la mineralogía magnética con ciclos de histéresis del tipo *needle-shape* se relaciona con valores de susceptibilidad más bajos. Estas observaciones podrían sugerir un conjunto de fuentes de flujo de sedimento constante, con un contenido eventual de ceniza volcánica a lo largo del tiempo.

En la figura 5.1 se observa la variación de la concentración de los minerales magnéticos sobre saliendo unos picos, indicando muy probablemente erupciones volcánicas en tiempos históricos. Esto se concluye debido a que la ceniza volcánica tiene una concentración ferromagnética considerable, ya que su depósito ocurre en relativamente poco tiempo. En dichas graficas se observa mayor variabilidad en la parte más antigua (27-22 m) disminuyendo entre 22-15 m y recientemente variabilidad homogénea y significativa.

De manera general, los parámetros que dependen del tamaño de grano (Figura 5.2) se pueden dividir en tres zonas: en la parte más superficial se observa un tamaño de grano menor, se puede decir que hubo menos lluvias o lluvias menos intensas que no pudieron acarrear granos de gran tamaño, siendo arrastradas partículas pequeñas por el viento. En la zona intermedia se ve cómo la gráfica va aumentando hasta 1500 cm, indicando aumento de lluvia. Finalmente, en la parte más profunda manteniéndose estable.

La tasa de sedimentación (Figura 5.10) nos indica tres intervalos: de 12 ka ~ hasta 6 ka con una tasa de sedimentación promedio de 2mm/año. Después se depositó a una velocidad promedio de 3 mm/año, se puede decir que este intervalo hubo mayores lluvias, confirmado por las especies dominantes de diatomeas –planctónicas-, teniendo en los últimos 2000 años en promedio 2.5 mm/año.

Esto nos indica tres ambientes diferentes; se sabe que la tasa de sedimentación en un lago depende directamente de la erosión de la cuenca, es decir la cantidad de lluvia que hubo en ese rango de tiempo. Con ello podemos decir que entre ~6 ka-2 ka hubo más erosión de la

cuenca, mayor tasa de sedimentación, posiblemente más lluvia. Esto se corrobora con las diatomeas identificadas, dominando la *Aulacoseira granulata* que indica turbidez.

La zona I (27.15 - 18.23 m) (de base a cima) indica un lago que podría decirse profundo y tranquilo, pues las especies dominantes son centrales, es decir de vida libre. Al mismo tiempo, estas especies dominantes, *S. aff. Nemanensis* y *S. minutulus* indican condiciones de salinidad en el agua, *Nitzschia palea* indica eutrofización y contaminación orgánica.

En la zona II (18.23 - 9.33 m), aunque si bien siguen dominando las dos especies de *Stephanodiscus* (*nemanensis* y *minutulus*), la tranquilidad del lago no es ya la misma. Esto lo evidencia la presencia de *Aulacoseira granulata*, además de que hay un aumento en las especies bentónicas. La presencia de *Cyclotella meneghiniana* indica contaminación y eutrofización\* (Giorgio et al., 1991).

La zona III (9.33 - 2.43 m) muestra un lago posiblemente con disminución en el nivel de agua, puesto que la asociación de especies bentónicas ya es mayor que en las dos zonas anteriores. No obstante, *Stephanodiscus aff. nemanensis* y *Aulacoseira granulata* sigue siendo abundante, lo que indica condiciones de agua turbia, alcalina y ricas en nutrientes.

Vale la pena mencionar que las especies diatomeas identificadas en este estudio se correlacionan con las reportadas previamente por Israde-Alcántara et al. (2015), Zárate del Valle et al. (2016) y Espinoza-Encinas et al. (2017) en sedimentos del lago de Chapala hasta una profundidad de 27 m.

\* Eutrofización: Proceso natural y/o antrópico que consiste en un enriquecimiento de las aguas con nutrientes –residuos orgánicos- a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de tal manera que la descomposición de la materia orgánica genera una disminución del oxígeno disuelto en las aguas profundas, provocando la proliferación de ciertas algas.

## 6.2 Conclusiones

Con el conjunto de parámetros identificados, tanto magnéticos como biológicos (diatomeas) se concluye que el Lago de Chapala en los últimos ~12ka ha pasado de un ambiente de lago profundo y tranquilo. Posteriormente cambia su tranquilidad, aumentando la turbidez del agua, posiblemente por más lluvias, en los últimos años disminuye el nivel del agua, aunque por las especies de diatomeas identificadas sigue siendo un lago con agua turbia.

Se observa que la principal variación en el registro de la susceptibilidad magnética (primeros 250 cm) tuvo lugar en el último medio siglo, probablemente debido a las descargas en el lago desde la época colonial al presente, mismas que son enriquecidas en componentes magnéticos gruesos –MD-.

Se obtuvo la variación del campo magnético a través del tiempo, es decir, la variación secular del campo magnético se observa en las variaciones evidentes en la figura 5.6.

El modelo de transformación -de profundidad a tiempo- para obtener la tasa de sedimentación, realizado en este estudio, parece ser una forma alternativa de superar el principal inconveniente de los registros sedimentarios semi-continuos.

## Referencias

- Alaniz-Álvarez S., Nieto-Samaniego A., y Ferrari L., 1998, Effect of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican volcanic belt, Unidad de Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Querétaro, México, pp. 1-9.
- Alaniz-Álvarez S., y Nieto-Samaniego A., 2005, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico, boletín de la sociedad geológica mexicana, pp. 65-82.
- Bautista, F. Cejudo-Ruiz, R. Aguilar-Reyes, B. y Gogichaishvili, A. 2014, El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 66, 365-376pp.
- Bastida, F., 2005, El campo magnético terrestre. En Geología, Una visión moderna de las ciencias de la Tierra (Vol. 1) 110-131 pp. España: TREA.
- Böhnell, H., y Molina-Garza, R., 2002, Secular variation in Mexico during the last 40,000 years: physics of the earth and planetary interiors, 133, 99-109.
- Butler, R., 2004, Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terrenes: Electronic Edition, Department of Chemistry and Physics University of Portland, Portland, Oregon. 248p.
- Caballero-Miranda C., 2011, La fábrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS), Monografías del Instituto de Geofísica, UNAM, n.16, México D.F.
- Cantoral-Uriza, E. A., 1997, Diatomeas (Bacillariophyceae) de ambientes lóticos en la cuenca baja de la Huasteca Potosina, Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias; división de estudios de posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chaparro, M., Böhnell, H., Byrne, R., Nowaczyk, N., Molina-Garza, R., Park, J., y Negendankl, F., 2008, Palaeomagnetic secular variation and rock-magnetic studies of Holocene sediments from a maar lake (Hoya de San Nicolas) in Central Mexico, Geophys, 175, 462-476.

- Chaparro, M., Gargiulo, J., Irurzun, M., Chaparro, M., Lecomte, K., Bohnel, H., Córdoba, F., Vignoni, P., Manograsso, T., Lirio, J., Nowaczyk, N., y Sinito, A., 2014, El uso de parámetros magnéticos en estudios paleolimnológicos en Antártica, *LATIN AMERICAN OF SEDIMENTOLOGY AND BASIN ANALYSIS*, 21(2) 77-96.
- Confederación Hidrológica del Ebro, 2010, Guía de las diatomeas de la cuenca del Duero, ministro del medio ambiente –Confederación del Ebro- España, 210p.
- de Anda, J., Quiñones-Cisneros, SE., French, RH., Guzmán, M., 1998. Hydrologic balance of Lake Chapala (Mexico), *J Am Water Res Assoc* 34:1319-1331.
- Dearing J., Hay k., Baban S., Huddleston A., Wellington W., Loveland P., 1996, Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophysical Journal International*, 127, pp. 728-734.
- Delgado G., H. 1992. A review of tectonics of the western Trans-Mexican Volcanic Belt. En: Subduction volcanism and tectonics of western Mexican Volcanic Belt. Ken'Ichiro Aoky (ed.). Tohoku University Sendai, Japón, pp. 80-103.
- Delgado-Granados, H., 1992. Tectonics of the Chapala region, México. In: Aoky, Ken'Ichiro (Ed.), Subduction, Volcanism and Tectonics of Western Mexican Volcanic Belt, pp. 194–212.
- Dörfler W, Zarate del Valle PF, Unkel I, Nelle O, Dominguez Vazquez G, Israde Alcantara I, Espinoza Encinas IR. **2015**. Lake Chapala – a long record of environmental change and human influence in western Mexico. *International Sedimentological Congress, Lanzhou, China. Abstracts*
- Ego F. y Ansan V., 2002, Why is the Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102j–99jW) in transtensive deformation?, *Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure de Paris, Tectonophysics*, pp. 189-2008.
- Espinoza Encinas I., Israde Alcántara I., Zárate del Valle P., Dörfler W. y Nelle O., 2015. El Registro De Diatomeas Y Cambios Ambientales En El Lago De Chapala

Durante El Holoceno. Reunión Anual, Unión Geofísica Mexicana, A.C.

Resúmenes.

- Espinoza Encinas, IR., Zárate del Valle P., Israde Alcántara I., Domínguez Vázquez G., 2017. Uso de geoquímica de elementos mayores y diatomeas fósiles para estimar períodos de humedad y aridez durante los últimos 14,000 años en el Lago de Chapala, México. XXVII Congreso Nacional de Geoquímica. Actas INAGEQ v23 -p20. ISSN-Latindex 2310-2799.
- Evans, M.E., and Heller, F., 2003, Environmental Magnetism: Principles and Applications of enviromagnetics. Academic Press, San Diego. 299p.
- Fernex, F., Zárate-del-Valle, P., Ramírez-Sánchez, H., Michaud, F., Parron, C., Dalmaso, J., Barci-Funel, G., Guzmán-Arroyo, M., 2001. Sedimentation rates in Lake Chapala (Western Mexico). Possible active tectonic control. Chem. Geol 177:213-228.
- Ferrari L., Garduño V., Innocenti F., Manetti P., Pasquaré G., y Vaggelli, G., 1994. Volcanic evolution of central Mexico: Oligocene to present. Geofis. Int. 33, pp. 91–105.
- Filonov AE, 2002, On the dynamical response of Lake Chapala, Mexico to lake breeze forcing. Hydrobiologia 467:141–157
- Gasse, F., 1980, Les Diatomees Lacustres Plio-Pleistocenes Du Gadeb (Ethipie) Systematique, Paleoecoloie, Biostratgraphie, Francia, p. 249.
- Gogichaishvili A., Morales J., Zarate-del Valle P., Pérez-Izazaga E., **2016**. A reconnaissance rock-magnetic and paleomagnetic survey on a 27 m long lacustrine core from Lake Chapala (western Trans-mexican Volcanic Belt. (CHAPHOLO Project, Conacyt grant 168685). Paper Number 3989. Abstract 35th International Geological Congress, Cape Town, South Africa.
- (<http://www.americangeosciences.org/information/igc>)

- Israde-Alcántara, I., Miller, W.E., Garduño-Monroy, V.H., Barron, J. y Rodríguez-Pascua M.A., 2010, Palaeoenvironmental significance of diatom and vertebrate fossils from Late Cenozoic tectonic basins in west-central Mexico: A review, *Quaternary International*, 219, 79-94.
- Israde-Alcántara, I., Rodrigo Velázquez Durán, Ma. Socorro Lozano García, Víctor Hugo Garduño Monroy, James Bischoff y Gabriela Domínguez Vázquez, 2010. Evolución paleolimnológica del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Volumen 62, núm. 3, 2010, p. 345-357
- Isabel Israde-Alcántara, Pedro F Zárate del Valle, Iván Espinoza Encinas, W Dörfler, O. Nelle. 2015. LATE PLEISTOCENE-HOLOCENE DIATOM RECORD OF LAKE CHAPALA (PROY CHAPHOLO-2014). 6th International Limnology Congress- Abstract Volume, Reno, Nevada, June 15-19, 2015. U.S.A. USGS Open-File Report 2015-1092, p97. (<https://pubs.usgs.gov/of/2015/1092/pdf/ofr2015-1092.pdf>.)
- Israde-Alcántara I, Domínguez-Vázquez G, Zárate-del Valle PF, Dörfler W, Unkel I, Espinoza-Encinas I, Oliver Nelle O. 2016. Climatic variability in western Mexico during Holocene (10,000 BP) interpreted from diatom and pollen record in sediment from Lake Chapala. (CHAPHOLO Project, Conacyt Grant 168685). Paper Number 4230. Abstract 35th International Geological Congress, Cape Town, South Africa. (<http://www.americangeosciences.org/information/igc>)
- Israde-Alcántara, I., y Mendoza, M.E., 2017, Los cuerpos de agua En: La biodiversidad en Michoacán, Estudio del Estado 2, vol. I. CONABIO, México, 71-82p.
- Kammer, K., Lange-Bertalot, H., 1988, Subwasserflora von Mitteleuropa, 2/1, p. 876; 2/2, p. 596; 2/3, p. 576 y 2/4, p. 436.
- King, JW, Banerjee S, Marvin J and Ozdemir O, 1982. A comparison at different magnetic Methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some Results from lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 59, 404–19.

- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. 1991a. Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. in Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. and Mollenhauer, D. (eds) Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/3. Gustav Fischer Verlag: Stuttgart, Jena. 576 pp.
- Krammer, K. y H. Lange-Bertalot, 1997a, Bacillariophyceae 2/1. Teil : Naviculaceae. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D Mollenhauer (Eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fisher Verlag. Stuttgart, Germany. 876 p.
- Krammer, K. y H. Lange-Bertalot, 1997b, Bacillariophyceae 2/2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D Mollenhauer (Eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fisher Verlag. Stuttgart, Germany. 437 p.
- Krammer, K. y H. Lange-Bertalot, 2004b, Bacillariophyceae. 2/4. Teil : Achnanthes s. l., Navicula s. str., Gomphonema. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D Mollenhauer (Eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fisher Verlag. Stuttgart, Germany. 468 p.
- Krammer, K. y H. Lange-Bertalot, 2004a, Bacillariophyceae. 2/3. Teil : Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D Mollenhauer (Eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fisher Verlag. Stuttgart, Germany. 598 p.
- Lanza R. y Meloni, A., 2009, The Earth´s Magnetism: An Introduction for Geologists: primera edición, Springer, Alemania, 267p.
- Lanza, R., y Meloni, A., 2009, The Earth´s Magnetism, An Introduction for Geologist, springer, New York, US, pp. 278.
- Leyden J., 2015, The geology and geography of lake Chapala and western Mexico, Mexconnect, pag. 1-7
- Liu Q., A. P. Roberts, J. C. Larrasoaña, S. K. Banerjee Y. Guyodo, L. Tauxe, y F. Oldfield, 2012, Environmental magnetism: Principles and applications, Rev. Geophys.,50.
- Lozano-García, S., Browm, E., Ortega, B., Caballero, M., Werne, \_J., Fawcett, p., Schwalb, A., Valero-Garcés, B., Schurrenberger, D., O´Grady, R., Stockhecke, M., Steinman,

- B., Cabral-Cano, E., Caballero, C., Sosa-Nájera, S., Soler, A., Pérez, L., Noren, A., Myrbo, A., Bucker, M., Wattrus, N., Arciniega, A., Wonik, T., Watt, S., Kumar, D., Acosta, C., Martínez, I., Cossio, R., Ferland, T., y Vergara-Huerta, F., 2017, Perforación profunda en el lago de Chalco: reporte técnico, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 69 no. 2, 299-311p.
- Lucchi, F.R. 1995. Sedimentological indicators of paleoseismicity. In: Serva L., Slemmons, D.B. (Eds.) Perspectives in Paleosismology. Association of Engineering Geologists Special Publication No. 6, pp. 7-17
- Maher BA, 1988, Magnetic properties of some synthetic submicron magnetites. Geophysical Journal 94, 83–96.
- Martínez-Abarca, L., 2017, Análisis de paleofuegos durante periodos de actividad volcánica en el Cuaternario tardío y su relación con el paleo-clima en el lago de Chalco, México: tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Merril, R. T., Michael, W., McElhinny, M. W., McFadden, P., 1996, The magnetic field of the earth: Paleomagnetism, the core and the deep mantle, San Diego, EUA, Academic Press Inc., 11-63p.
- Michaud F, Ramírez-Sánchez HU, Parron C, Zárate-del-Valle PF, Fernex F, Barci-Funel G, 2006. Strong magnetic levels in Lake Chapala sediments (western Mexico): THEIR MINERALOGY AND STRATIGRAPHIC SIGNIFICANCE. J. Paleolimnol 35:819–836.
- Muniz, L., 1997, El geomagnetismo. Cuadernos del Instituto de Geofísica, 11. México, Instituto de Geofísica, UNAM –Ed Plaza Valdés, 52pp.
- Pasqueré G., Ferrari L., Garduño-Monroy V.H., 1991, Geology of the Mexican Volcanic Belt, state of Guanajuato and Michoacán. Geology Society of America. Maps and Chart series. CMH 072.
- Pavón-Carrasco, F; J. Rodríguez-González; M. L. Osete; J. M. Torta, 2011, A Matlab tool for archeomagnetic dating. Journal of Archaeological Science. 38:408-419. ?

- Ramírez, S., Hermes, U., Zárate del V., P., García, G., Mario, E., De la Torre, V., Israde A., I., y Meulenert, A., 2007, Disolución de sílice biogénica en sedimentos de lagos utilizando como bioindicadores de calidad del agua, *e-Gnosis*, 5, 20.
- Reavie, E., Sgro, G., Esepp, L., Bramburger, A., Shaw, V., Pillsbury, R., Cai, M., Stow, C., y Dove, A. 2017, Climate warming and changes in *Cyclotella* sense lato in the Laurentian Great Lakes, *limnology and oceanography*, 62, 768-783.
- Reitz J., et. al. 1972 *Fundamentos de la Teoría electromagnética*, Argentina: México Addison-Wesley Iberoamérica 584 pp.
- Rosas-Elguera, J. y Urrutia-fucugauchi, J., Tectonic Control of the Volcano-Sedimentary Sequence of Chapala Graben, Western Mexico: *International Geology Review*, 40, 350-362p.
- Rosas-Elguera, J.G., Urrutia-Fucugauchi, J. and Maciel, R., 1989. Geología del extremo oriental del graben de Chapala: Breve discusión sobre su edad - Zonas geotermicas Ixtlan de 10s Hervores-Los Negritos, Mexico. *Geotermia*, 5: 3-18.
- Segura, V., 2011, *Taxonomía y Ecología de las Diatomeas Epilíticas de la Cuenca del Alto Lerma, México*, México: Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sotelo E., Cardona N., Fregoso A., Enriquez C., Garrido A., Caire G., y Cotler H., 2005, *Acciones estratégicas para la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala: recomendaciones técnicas para las diecinueve subcuencas*, Dirección de Manejo Integral Ev de Cuencas Hídricas Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas, instituto nacional de ecología.
- Spaulding, S.A., Lubinski, D.J. and Potapova, M. (2010). *Diatoms of the United States*. <http://westerndiatoms.colorado.edu> consultado el 24 de enero 2017.  
[http://westerndiatoms.colorado.edu/about/what\\_are\\_diatoms](http://westerndiatoms.colorado.edu/about/what_are_diatoms)
- Tauxe, L., 2008, *Essencial of Rock and Paleomagnetism*: 509p.  
<https://earthref.org/MagIC/books/Tauxe/Essentials/>

- Thompson R., Battarbee R., O'Sullivan PE and Oldfield F., 1975, Magnetic susceptibility of lake sediments. *Limnology and Oceanography*, 20, 687-698.
- Thompson, R., and Oldfield, F., 1986, *Environmental Magnetism*. London: Allen and Unwin.
- Udias, A. y Mezcuca, J., 1986, *fundamentos de Geofísica: primera edición*, Alhambra, México, 419p.
- Vázquez-Castro, G., Ortega-Guerrero, B., Rodríguez, A., Caballero, M., y Lozano-García S., 2008, Mineralogía magnética como indicador de sequía en los sedimentos lacustres de los últimos ca. 2,600 años de Santa María del Oro, occidente de México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 25, núm 1, 21-38p.
- Vázquez-Castro G., 2011. Magnetismo de rocas de una secuencia Holocénica en el lago Etzatlán, Jalisco, México: *Latinmag Letters*, V.6, 1-5p.
- Vázquez -Castro G., 2012, Magnetismo Ambiental de los Últimos 17,000 años en el Lago de Zirahuén, Michoacán México, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, México D.F., 221 pp.
- Wendy Guiry in Guiry, M.D. & Guiry, G.M. 2017. *Algae Base*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; consultada el 28 de febrero del 2017.
- Zárate-del Valle P., Ramírez-Sánchez, H., Fernex, F., Spmoneit, B., Israde-Alcántara, I., 2010, Radiocarbon age inversions and progression: source and causes in Late Holocene sediments from Lake Chapala, western México: *Environmental Earth Sciences*, 63:1011-1019.
- Zárate-del Valle, P.F., 2002, El concepto de suelo según el geólogo y el Ing. Civil, caso estudio el subsuelo de la Ciudad de Guadalajara, Jalisco, México: *Unión Geofísica Mexicana*, Geos, 22(2), 263.
- Zárate-del Valle, P. y Simoneit, B., 2005, La generación de petróleo hidrotermal en sedimentos del Lago de Chapala y su relación con la actividad geotérmica del rift

Citala en el estado de Jalisco, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22, 358-370pp.

Zárate del Valle PF, Dörfler W, Nelle O, Israde-Alcántara I. 2014. chapholo (chapala-holocene) chapholo: Paleolimnological Evaluation of Lake Chapala (western Mexico) during the past 10,000 years (Conacyt CB2011, Grant 168685, in progress). Phase I: drilling campaign. Fall Meeting, American Geophysical Union. ID: PP31A-1115.