



# Universidad Nacional Autónoma de México

Posgrado en Ciencias de la Tierra



Centro de Geociencias, Campus Juriquilla

“Estudio de magnetismo ambiental para la  
determinación de paleoclimas y  
paleoambientes, en la cuenca de Serdán  
Oriental”

## **Tesis**

Que para optar por el grado de maestro en Ciencias de la  
Tierra

### **Presenta:**

Kurt Heinrich Wogau Chong

### **Tutor Principal:**

Dr. Harald Norbert Boehnel (UNAM, Centro de Geociencias)

### **Miembros del comité tutor:**

Dr. Roberto Stanley Molina Garza (UNAM, Centro de Geociencias)

Dr. José Jorge Aranda Gómez (UNAM, Centro de Geociencias)

Dr. Marcos Chaparro (Instituto de Física Arroyo Seco, Universidad Nacional del Centro de la  
Provincia de Buenos Aires)

Dr. Roy Priyadarsi (UNAM, Instituto de Geología)

**Abril, 2013**



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.

## **Agradecimientos.**

Al Dr. Harald Boehnel por todo lo que me ha ayudado en este proyecto y a lo largo de mis cuatro años de estancia en el CGEO, tanto en lo académico como en lo personal. También agradezco la confianza que usted tuvo en mí para llevar este trabajo a un buen fin.

Agradezco al proyecto CONACYT y al programa US-MEXUS, por otorgarme los medios económicos necesarios para realizar este trabajo. Al Centro de Geociencias Campus Juriquilla y a la Universidad de UC Davis por haberme facilitado toda la infraestructura necesaria para esta investigación,

Al Dr. Roberto Molina, por que desde el primer día que llegué al CGEO me dio toda la ayuda que he necesitado. También por todas tus críticas a mi trabajo, esto me hizo mejorarlo mucho.

A mis sinodales al Dr. Jorge Aranda, gracias por todos los comentarios que hizo a mi trabajo y también gracias por la última plática que tuve con usted me va servir mucho. Al Dr. Marcos Chaparro, por aclararme muchas de mis dudas en mi trabajo y todas las críticas al mismo.

Al Dr. Ken Verosub, por toda la ayuda prestada en la obtención e interpretación de datos durante mi estancia de investigación en la Universidad UC DAVIS.

También al mejor técnico del Centro de Geociencias Campus Juriquilla, Ing. Jorge Escalante, gracias por todo tu apoyo técnico, en especial por la balanza de Curie. También por tu sincera amistad.

A la Dra. Marina Vega por ayudarme a obtener imágenes del SEM y al Dr. Pablo Dávila por ayudarme a identificar tefras en mis sedimentos lacustres.

A todos mis maestros en especial a la Dra. Lucía Capra y al Dr. Gerardo Carrasco, por la clase tan interesante que me impartieron.

Odio todo el papeleo, por eso quiero agradecer a la Lic Marta Pereda por nunca negarme ayuda en cuestiones administrativas.

También quiero agradecer a mis amigos: Alma, Marian, Jazmín, Ana, María Isabel, Paola, Berta, Sara, Charles, Ana, Rodrigo, Victor, Isac, Uru, Jobo, Ramon, Miguel, Chilo, Francisco, por estar conmigo en las muy buenas y en las muy malas todo este tiempo. A José Luis Rodríguez por darme la confianza en trabajar contigo y ayudarme en la revisión de mi escrito.

Agradecimiento especial a Jacob Selander, Skykomish Selander, Lauren Austin, Lena Shifter y Joshua Gerber por haberme abierto las puertas de sus casas y por ofrecerme su amistad en mi estancia en Davis CA.

A Verónica por todo! y por aparecer en mi vida. Te amo!

## **Dedicatoria**

Quiero dedicar este trabajo a mi mamá Ma. del Carmen, mi papá Helmuth y mi hermano Helmuth, gracias por siempre creer en mí, son la base de mi vida, por eso los llevo tatuados en mi pie, por que se que en cada paso que de se están conmigo. También a toda mi familia y a mi cuñada Dayana por ser una buena compañera de mi hermano.

Axel, quiero decirte que siempre serás mi primer sobrino, tu repentina partida me ha llenado de tristeza. Siempre te tengo en mis pensamientos a todos lados que voy, te quiero mucho.

A mi amigo Vulcanólogo Víctor Vargas, te extraño demasiado y me haces mucha falta. Hice mi máximo esfuerzo en esta tesis tal como tu lo hiciste en la tuya y como me enseñaste a trabajar. Siempre te lo dije que eras un ejemplo para mi en todo sentido. Espero que nos volvamos a ver en esta vida o en la otra. Te quiero mucho.

# Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>xii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. CAPÍTULO 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Justificación. ....	3
1.2 Hipótesis de trabajo.....	5
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Metas.....	5
<b>2. CAPÍTULO 2. Generalidades del magnetismo ambiental.</b> .	<b>7</b>
2.1 Introducción. ....	7
2.2 Orígenes de los minerales magnéticos.....	11
2.3 Minerales magnéticos en sedimentos de lago. ....	13
2.4 Magnetización remanente en sedimentos lacustres.....	15
2.4.1 Magnetización remanente natural (NRM). ....	15
2.4.2 Magnetización remanente detrítica.....	16
2.4.3 Física del alineamiento de un momento magnético en medio viscoso. .....	16
2.5 Correlación. ....	18
<b>3. CAPÍTULO 3. Antecedentes climáticos e históricos de Serdán Oriental.</b> .....	<b>20</b>

<b>3.1</b>	<b>Arqueología del área.....</b>	<b>20</b>
3.1.1	Zona Arqueológica de Cantona. ....	21
<b>3.2</b>	<b>Erosión como factor de modificación del ambiente generado por las antiguas culturas. ....</b>	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>Cambios climáticos de corta frecuencia.....</b>	<b>25</b>
3.3.1	Último máximo glacial – Holoceno temprano.....	25
3.3.2	El óptimo climático.....	26
3.3.3	Deterioro climático del Holoceno tardío.....	27
3.3.4	Período Cálido Medieval y la Pequeña Edad del Hielo. ....	28
3.3.5	Causas de cambios climáticos en el Holoceno.....	30
<b>3.4</b>	<b>Breve descripción del clima en México.....</b>	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>Registro climático para el centro de México. ....</b>	<b>33</b>
3.5.1	-Lago Santa María del Oro. ....	34
3.5.2	Lago de Páztcuaro y la Piscina de Yuriria ....	35
3.5.3	Laguna de Juanacatlan. ....	35
3.5.4	Laguna Punta. ....	36
3.5.5	Registros de glaciares ....	37
3.5.6	Registros de polen.....	37
3.5.7	Sitio Arqueológico Tlapacoya. ....	38
3.5.8	Lago de Chalco. ....	38
3.5.9	Hoya San Nicolás Guanajuato.....	38
3.5.10	Estalagmita Juxtlahuaca.....	39
3.5.11	Actividad humana como indicador climático.....	39
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO 4. Entorno geológico del área de estudio ....</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Introducción. ....</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Localización del Área de estudio.....</b>	<b>42</b>

<b>4.3</b>	<b>Rasgos fisiográficos del cráter Aljojuca .....</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>Hidrografía .....</b>	<b>44</b>
<b>4.5</b>	<b>Vulcanismo de Sérđan Oriental. ....</b>	<b>45</b>
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO 5. Metodología. ....</b>	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>Obtención de Núcleos del Lago Aljojuca. ....</b>	<b>46</b>
5.1.2	Sistema de perforación.....	47
<b>5.2</b>	<b>Preparación del núcleo.....</b>	<b>49</b>
5.2.1	Descripción de los núcleos .....	49
5.2.2	Toma de muestras.....	49
5.2.3	Cubos .....	49
5.2.4	Popotes .....	50
<b>5.3</b>	<b>Metodología de laboratorio. ....</b>	<b>51</b>
5.3.1	Susceptibilidad Magnética. ....	51
5.3.2	Susceptibilidad de baja resolución .....	51
5.3.3	Susceptibilidad de alta resolución. ....	52
5.3.4	Mediciones de NRM y ARM.....	52
5.3.5	Principio de funcionamiento de magnetómetro criogénico. ....	53
5.3.6	Magnetización remanente natural (NRM) .....	53
5.3.7	Magnetización Remanente Anhistérica (ARM) .....	54
5.3.8	Magnetización Remanente Isotérmica (IRM).....	54
5.3.9	Histéresis.....	55
5.3.10	Curvas Termo-magnéticas. ....	56
5.3.11	Fechamientos. ....	56
<b>5.4</b>	<b>Análisis de resultados. ....</b>	<b>57</b>
5.4.1	Determinación de la dirección de magnetización remanente característica.....	57



5.4.2	Razones de parámetros magnéticos .....	58
5.4.3	Análisis de curvas de IRM. ....	59
<b>6.</b>	<b>Capítulo 6. Resultados.....</b>	<b>63</b>
6.1	Correlación de los núcleos .....	63
6.2	Estratigrafía Núcleo compuesto Aljojuca. ....	69
6.3	Modelo de edades. ....	73
6.4	Resultados paleomagnetismo. ....	75
6.5	Estratigrafía magnética.....	78
6.6	Resultados de concentración de minerales magnéticos.....	87
6.7	Resultados tamaño de partícula. ....	90
<b>7.</b>	<b>Capítulo 7. Discusión y conclusiones. ....</b>	<b>95</b>
7.1	Discusión direcciones paleomagnéticas. ....	95
7.2	Discusión parámetros magnéticos.....	98
7.2.1	Composición Mineralógica.....	98
7.2.2	Minerales magnéticos del Lago Aljojuca .....	100
7.2.3	Concentración .....	101
7.2.4	Tamaño de partícula.....	101
7.3	Historia paleoclimática y ambiental del lago Aljojuca. ....	102
7.4	Conclusiones.....	107
7.4.1	Método de magnetismo ambiental.....	107
7.4.2	Modelo de edades .....	107
7.4.3	Curva de variación secular .....	107
7.4.4	Estratigrafía magnética.....	107

7.4.5 Registro climático ambiental del Lago Aljojuca..... 108

**8. Referencias..... 110**

## Lista de figuras

- Figura 2.1. Figura que describe el flujo de partículas magnéticas, por diferentes agentes de transporte así como los distintos procesos naturales y antropogénicos que las originan. La letra R indica redepositación de los sedimentos, D es la depositación y AU es la autogénesis (modificada de Thompson,1986).....7
- Figura 2.2. Modelo simplificado de la entrada y salida de partículas magnéticas un ecosistema lacustre y los procesos que pueden sufrir antes de ser depositados (modificada de Evans y Heller 2003)..... 14
- Figura 2.3. Correlación estratigráfica a través de registro de susceptibilidad de alta resolución de los núcleos Tlaloc, Ajalapazco y Oriental pertenecientes al lago Aljojuca..... 19
- Figura 3.1. Mapa de ubicación de la zona arqueológica de Cantona, donde se muestran sitios arqueológicos principales del centro y sur de México. ....20
- Figura 3.2. Estructura piramidal de la zona arqueológica de Cantona.....22
- Figura 3.3. Esquema que muestra la participación de la recolección, agricultura y cacería en las diferentes etapas y períodos de ocupación en la zona de Puebla Tlaxcala (Tomada de García, 1986).....24
- Figura 3.4. Variación en temperatura durante el último milenio de diferentes zonas, estas curvas fueron determinadas con diferentes indicadores climáticos y registros históricos. También, se muestra el cálido Medieval, la Pequeña Edad de Hielo y la media anual durante los períodos 1000 a 1400 d.C y 1400 a 1900 d.C. Imagen tomada de Mann, (2002). .....29
- Figura 3.5. Imagen que muestra las zonas intertropicales y su distribución global durante los meses de Enero y Julio (<http://climate.nasa.gov/>) .....32
- Figura 3.6. Figura donde se observan los principales climas de México y las zonas geográficas que abarcan (imagen tomado de [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)). ....33

Figura 3.7. Mapa de ubicación de los diferentes indicadores ambientales utilizados en la recopilación bibliográfica del presente trabajo. A) Santa María del Oro B) Piscina de Yuriria C) Lago de Patzcuaro D) Laguna Juanacatlán E) Registros Glaciares F) Sitio Arqueológico de Cantona G) Hoya de San Nicolás H) Lago de Chalco I) Sitio Arqueológico Tlapacoya J) Sitio Arqueológico Maya K) Laguna Punta L) Estalagmita Juxtlahuaca .....34

Figura 3.8. Tabla de los diferentes indicadores climáticos utilizados para ser comparados con el registro del lago Aljojuca, así como eventos históricos importantes posiblemente relacionados con cambios ambientales y climáticos. ....41

Figura 4.1. Mapa de localización del lago Aljojuca, ubicado entre los municipios de Villa Aljojuca y San Juan Atenco.....43

Figura 4.2. Vista en corte en planta y batimetría del Cráter Maar Aljojuca. La distancia que existe en el eje mayor es de 1.5 Km mientras que en el eje menor es de 1 km y su profundidad máxima es de 50.6 m. Las dos estrellas negras muestran los lugares donde se perforaron los núcleos (Modificada de Gasca 1981). ....44

Figura 5.1. Los puntos amarillos representan la ubicación de los núcleos Tlaloc, Oriental y Ajalapazco en el lago Aljojuca.....46

Figura 5.2. Partes principales del sistema de perforación utilizado para obtener los núcleos del lago Aljojuca, imagen modificada de Mingram et al., 2010 .....48

Figura 5.3.- Figura que describe la toma de muestras en cubos plásticos, utilizados para mediciones de susceptibilidad magnética y propiedades como NRM, ARM e IRM y muestras en popotes utilizados para mediciones de ciclos de histéresis. ....50

Figura 5.4. Sensores Bartintong Ms2b utilizado para mediciones de susceptibilidad de baja resolución y sensor MS2E utilizado para mediciones de susceptibilidad de alta resolución. ....51

Figura 5.5. Magnetómetro criogénico, donde se realizaron mediciones de NRM y ARM.....	54
Figura 5.6. Magnetómetro de pulso utilizado para mediciones de IRM, el campo máximo que alcanza es de 3 T. ....	55
Figura 5.7. Análisis de componentes de las curvas de IRM, (A) gráfica de adquisición lineal de IRM (LAP) (B) gráfica de gradiente de adquisición de IRM (GAP) (C) gráfica de adquisición estandarizada (SAP). Imagen tomada de Kravtsov et al 2001.....	60
Figura 6.1. Correlación de los núcleos Tlaloc (color negro), Oriental (color verde) y Ajalapazco (color azul) a través de el registro de susceptibilidad magnética y marcadores estratigráficos como las tetras volcánicas (representadas por líneas rojas). ....	64
Figura 6.2. Tabla de la relación y posición estratigráfica que guardan las tetras entre los tres diferentes núcleo. Imágenes de las tres tetras contenidas en el núcleo Aljojuca, formadas de material juvenil félsico. ....	65
Figura 6.3. Diagrama que muestra los segmentos de los tres núcleos que fueron utilizados para formar el núcleo compuesto Aljojuca a partir de los núcleos Tlaloc, Oriental y Ajalapazco. ....	66
Figura 6.4. Señal de susceptibilidad magnética del núcleo compuesto Aljojuca, dividida en las siete zonas principales que se utilizaron para la caracterización de la granulometría magnética ....	67
Figura 6.5. Imágenes de alta resolución de las cinco facies definidas para el núcleo compuesto Aljojuca. ....	71
Figura 6.6. Columna estratigráfica del núcleo compuesto Aljojuca, los triángulos negros indican gradación normal, las líneas punteadas muestran la proporción de variación de sedimentos limo-arcillosos y la proporción de arenas. Esta columna es comparada con un registro de susceptibilidad magnética, dividido en las principales facies reconocidas, de color verde para	

las facies A, color azul para facies B, colores morado facies C, color gris facies D, color naranja facies E y color rojo para los horizontes de tetras. ...72

Figura 6.7. Modelo de edades calibradas AP del lago Aljojuca. Se graficaron las diversas edades C14 con sus barras de error. La línea punteada representa la interpolación realizada entre los 0 y 200 cm de profundidad. La línea continua muestra el modelo lineal aplicado a los datos de 200, 400, 421.7 y 613. ....73

Figura 6.8. Ejemplos de diagramas ortogonales de desmagnetización de las diferentes zonas, en las que se dividio el núcleo compuesto Aljojuca. Se muestran diagramas de Zidervedl y redes estereográficas representativos de cada zona. En los diagramas de Zidervedl se muestran con puntos azules la componente horizontal y cuadros rojos la componente vertical. Para las redes estereográficas los puntos cerrados representan la declinación y los abiertos la inclinación. ....75

Figura 6.9. Curvas de declinación e inclinación de los núcleos Tlaloc, Oriental y Jalapazco. Las líneas punteadas son los intervalos utilizados en la correlación entre los núcleos utilizando el parámetro de susceptibilidad. La línea sólida pertenece al VGP de la localidad.....77

Figura 6.10.- Estratigrafía del núcleo Aljojuca dividida en las siete zonas principales y la variación del factor S y la susceptibilidad magnética. ....83

Figura 6.11. Curvas de histéresis representativas de cada una de las siete zonas del núcleo compuesto Aljojuca.....84

Figura 6.12. Curvas termo-magnéticas representativas de las siete zonas del núcleo compuesto Aljojuca. ....85

Figura 6.13. Curvas de IRM representativas de las siete zonas del núcleo compuesto Aljojuca.....86

Figura 6.14. Comparación de parámetros magnéticos que dependen de concentración contra la columna estratigráfica del núcleo Aljojuca. La

secuencia de parámetros está dividida en siete zonas principales utilizadas para distinguir diferentes características de estas señales.....	89
Figura 6.15. Comparación de columna estratigráfica, contra diferentes razones para la identificación de tamaño de partículas. ....	92
Figura 6.16. Gráfico “Day” para cada zona de el núcleo Aljojuca, en la parte inferior se observa un diagrama con el conjunto de las siete zonas.....	93
Figura 6.17. Gráfico “King” para las diferentes las zonas del núcleo Aljojuca. En la parte inferior se observan graficadas las siete zonas en un solo diagrama.....	94
Figura 7.1. Minerales magnéticos en condiciones de depositación normal de un lago. Se observa que los cristales alcanzan a orientarse con el campo magnético presente, mientras para zonas afectas con corrientes de turbidez los cristales difícilmente se pueden orientar. ....	96
Figura 7.2. Registro de ARM donde se relaciona las altas intensidades con depósito de turbiditas e intensidades bajas para el registro del parámetro NRM/X . También se observan dos fotos con las principales características de los depósitos de turbiditas como bordes erosivos y la gradación normal.	97
Figura 7.3. Principales propiedades magnéticas utilizadas para la interpretación climática y ambiental del lago Aljojuca, así como los acontecimientos históricos de interés en el área y eventos climáticos. ....	106

## **Lista de Tablas.**

Tabla 2.1. Tabla donde se muestra las principales propiedades magnéticas y los minerales magnéticos más comunes. ....	11
Tabla 2.2. Muestra las diferentes fuentes de proveniencia, locación de origen, agente de trasporte y tipo de minerales magnéticos (tomada de Thompson y Oldfield 1986).....	15
Tabla 5.1. Tabla que muestra las distintas propiedades magnéticas que fueron utilizados para determinar la granulometría magnética de las muestras. También muestra el símbolo, unidades e interpretación de estas propiedades.....	59
Tabla 6.1. Muestra las cuatro edades calculadas y calibradas con intcal98.14c (tuiver,1998) del núcleo Aljojuca.....	74
Tabla 6.2. Tabla que muestra la cronología de hechos históricos calculados a partir del modelo de edades del núcleo Aljojuca.....	74
Tabla 6.3. Comparación de los promedios para los parámetros magnéticos de la curva de histéresis, curvas de IRM y razón S para el núcleo compuesto Aljojuca. También se muestran las desviaciones estándar de cada uno de los parámetros y el número de muestras utilizadas para la obtención de estos promedios.....	78



## Resumen

El lago Aljojuca está ubicado en la Cuenca de Serdán Oriental en el estado de Puebla entre los municipios de San Juan Atenco y San Salvador el Seco. De él se obtuvieron tres núcleos, para el estudio de su mineralogía magnética con el objetivo de establecer los paleoclimas-paleoambientes para el centro de México así como definir una curva de variación secular para la zona. Utilizando los parámetros dependientes de concentración se realizó la correlación de los tres núcleos, generando el núcleo compuesto Aljojuca. La longitud de este núcleo es 1171.2 cm que abarca los últimos 5460 años; esta edad se obtuvo a partir de un modelo de edades con cinco fechamientos C14. El núcleo fue dividido en siete zonas que comparten las mismas características de diferentes parámetros magnéticos como los dependientes de concentración. Los resultados arrojaron que los minerales magnéticos predominantes en el lago Aljojuca son titanomagnetita y magnetita, también se detectó la presencia de hematita y sulfuros como pirita y/o pirrotita. Los diagramas utilizados para establecer el tamaño de partícula, como King Plot y Day Plot, mostraron que el tamaño de partícula predominante en el lago Aljojuca es el de pseudo-dominio sencillo. Comparando los resultados de mineralogía magnética con proxies climáticos para el centro de México se obtuvo que de la zona I a IV que abarcan el Holoceno medio predominan climas húmedos debido a la alta cantidad de facies arenosas y altas intensidades en parámetros de concentración. Para la zona V que comprende el Holoceno tardío se interpreta como condiciones de climas cálidos y secos, debido al establecimiento de una zona de reducción en el lago por la alta cantidad de nutrientes y materia orgánica. Este episodio de incremento de temperatura coincide en temporalidad con el abandono de la ciudad prehispánica de Cantona hacia el 950 d.C. En las zonas VI y VII se observa una alta perturbación del registro paleoclimático ambiental debido al factor antropogénico.

## **Abstract**

Aljojuca lake is located in the Serdan Oriental basin in the state of Puebla, in the eastern part of the Transmexican Volcanic Belt. Three lake sediment cores were recovered for studying the magnetic mineralogy, establish the paleo environmental conditions of the area and gather data of the secular variation for the Holocene in Mexico.

Core images and magnetic concentration-dependent parameters were used to correlate the core sections and then build a compound core. The length of this core is 1171.2 cm and the maximum age is 5460 years according to five C14 ages. The core was subdivided into seven zones with similar behavior of the magnetic concentration-dependent parameters. The results shows that the main magnetic minerals in Aljojuca lake are magnetite and titanomagnetite, with the rare presence of hematite and iron sulfurs like pyrrhotite. The principal magnetic grain size observed in the sediments is pseudo single-domain, determined from King and Day plots. Comparing the results of magnetic mineralogy with different climatic proxys in the center of Mexico we discovered that between zones I to IV the high concentration of sandy facies, related to high values of magnetic concentration-dependent parameters, were formed in wet weather conditions. In zone V we relate high concentration of organic matter to more reducing conditions during the dry climates. This episode coincides with the fall of prehispanic city of Cantona around 950 a.C. Zones VI and VII are characterized by anthropogenic activity.

## CAPÍTULO 1

### Introducción

Los estudios paleoambientales son de gran interés para las investigaciones recientes acerca del cambio climático global. Su objetivo principal es comprender la variabilidad climática en el pasado y los factores que la originaron ya sean naturales o antropogénicos para tratar de interpretar los actuales y futuros climas. La mayor parte de los estudios de paleoambientes se han centrado en el período Cuaternario que abarca los últimos 2.6 millones de años, ya que se caracterizó por grandes fluctuaciones climáticas debido a la dinámica de las grandes capas de hielo que avanzaron y retrocedieron sobre la superficie continental. Estos avances y retrocesos son conocidos como periodos glaciales e interglaciares. Es evidente que durante estos períodos existieron cambios climáticos globales que quedaron registrados en varios indicadores naturales.

Actualmente existe un gran debate acerca de la relación los cambios climáticos y el auge y la caída de diversas culturas; algunos de los casos mas conocidos son la caída de la cultura Acadiana a los 4200 A.P. en Asia. El colapso Maya a los 1200 años d.C. en la región de Mesoamérica y la caída de la cultura Tiwanaku a los 1000 A.P. en Sudamérica (deMedocal, 2001). Se le conoce como determinismo climático a la corriente del pensamiento que menciona que los cambios climáticos drásticos, por causas naturales, es el principal factor para la caída de sociedades. Entonces las preguntas que están en el aire son ¿se pueden encontrar patrones de climas del pasado que ayuden a comprender y predecir el clima futuro en una región dada? y ¿cómo afectaron a las sociedades antiguas las variaciones climáticas?

En el centro México existen muchos sitios de interés en donde se pueden llevar a cabo estudios paleoclimáticos y poner a prueba las ideas postuladas por el determinismo climático. Los primeros estudios paleoambientales se realizaron en el lago de Pátzcuaro (Deevey,1944). A pesar de la gran cantidad de indicadores naturales que existen en el centro de México y décadas de estudio aun no hay un consenso general sobre el paleoclima en

el Holoceno. Uno de los problemas principales es que la señal climática frecuentemente queda enmascarada por la actividad antropogénica, (Watts y Bradbury, 1982). Otras fuentes de incertidumbre son la gran actividad volcánica y tectónica que pueden generar grandes *hiatus* de información en el registro climático.

En este estudio se tratará de inferir las variaciones climáticas y el impacto de actividades antropogénicas durante el Holoceno en el centro de México usando sedimentos de lago como indicadores naturales. La investigación implica el empleo de la técnica de magnetismo ambiental. Los sedimentos lacustres acumulados en el interior de los maares ofrecen un registro de alta resolución de cambios ambientales y climáticos dado que se trata de cuencas cerradas con una fuente muy restringida de sedimentos. La esencia del magnetismo ambiental, es utilizar la mineralogía magnética como indicador climático y ambiental (Dekkers, 1997).

El objetivo secundario de la investigación es contribuir con datos de variación secular para la curva maestra del Holoceno en México; dado que con los sedimentos de lago se puede obtener un registro de alta resolución de las variaciones del campo magnético que se ajusta un modelo de edades confiable.

En la actualidad en México no existe una curva de variación secular confiable aunque existan diversos registros naturales de las variaciones del campo magnético, como flujos de lava históricos, estalagmitas y sedimentos de lago y también registros arqueológicos (cerámicas) que han aportado algunos datos aislados. Los primeros esfuerzos por establecer una curva de variación secular en México fueron realizados por Ortega-Guerrero (1992) para una curva con edad máxima de 24 mil años, usando sedimentos lacustres del lago de Chalco. Sin embargo, al estar este caracterizado por aguas poco profundas, frescas y condiciones de pantano, se obtuvo un modelo complejo de edades. Un factor técnico que hace que la curva de Ortega-Guerrero (1992) sea poco confiable, fue la obtención de la magnetización característica de los sedimentos solo con un paso de 15 mT debido a las limitaciones

técnicas de la época, siendo una intensidad no suficiente para alcanzar a aislar la componente primaria.

Recientemente, Boehnel y Molina-Garza (2002) combinaron varios registros como estalagmitas, flujos de lava jóvenes y artefactos arqueológicos con edades concordantes para establecer una curva de variación secular para los últimos 40 000 años, comparando los datos con las direcciones del dipolo geocéntrico axial local. En general, se observa una buena correlación entre los distintos registros, aunque de este estudio se destaca que las estalagmitas muestran el mejor registro del campo magnético. A pesar de estos esfuerzos, se necesitan realizar más estudios en diversos registros naturales. Boehnel y Molina-Garza (2002) propusieron que el estudio de lagos cráteres tipo maar de sistema de lago cerrado, ofrecen una buena opción debido a que pueden mostrar un registro continuo de alta resolución del campo magnético.

Chaparro y colaboradores (2008), obtuvieron el registro de variación secular en sedimentos recuperados de tres núcleos superficiales colectados del cráter mar San Nicolás, en el Estado de Guanajuato donde se observó que estos muestran una buena correlación en las direcciones de declinación e inclinación entre ellos. También se observa buena correlación con curvas de variación secular para Norte America, Reino Unido y Finlandia.

## **1.1 Justificación.**

### **¿Por qué usar sedimentos de lago como indicadores paleoclimáticos?**

Los sedimentos de lago son indicadores ambientales naturales que han sido usados en paleomagnetismo para el estudio del campo magnético y su variación secular. Debido a que estos ofrecen un registro continuo y de alta resolución de estas variables, por la calidad de los procesos de adquisición de magnetización remanente al momento de la sedimentación y litificación. Por otro lado los sedimentos de lago también proveen un registro de alta resolución ambiental. Otra ventaja de los indicadores magnéticos naturales

es que pueden facilitar la correlación entre otros registros ambientales como, polen, diatomeas e isótopos de oxígeno, dando mayor información.

### **¿Por qué estudiar el Cuaternario para observar variaciones climáticas?**

El Cuaternario es el último periodo de la escala de tiempo geológico, este abarca aproximadamente 2.6 Ma. y se divide en dos épocas el Plioceno, Pleistoceno y Holoceno. La característica principal de este período es que ha sido marcado por una secuencia de eventos glaciales e interglaciares. El último período glacial terminó hace 10 000 años, es ahí donde comienza la época del Holoceno.

Debido a estas fluctuaciones glaciares, en el período Cuaternario se han producido cambios climáticos y ambientales significativos, de estos cambios existen gran cantidad de registros naturales. Las variaciones climáticas de la Tierra no solo están presentes en el período Cuaternario, en la historia del planeta, cambios de la configuración de los océanos y continentes, regresiones marinas, levantamiento de montañas formando barreras naturales, han sido factor directo, para que el clima en la Tierra haya variado.

### **¿Cuáles son las ventajas que ofrece el magnetismo ambiental?**

- Las técnicas de medición son sencillas de efectuar.
- Las propiedades magnéticas pueden ser medidas rápidamente.
- Bajo costo
- No es una técnica destructiva o de perturbación mínima.
- Los buenos resultados que se han descrito en la literatura.
- La buena correlación de los resultados de magnetismo ambiental con otros indicadores ambientales

## 1.2 Hipótesis de trabajo

¿Se pueden observar los cambios climáticos en el Holoceno para el centro de México, usando los sedimentos del lago Aljojuca con la técnica del magnetismo ambiental? ¿Este registro climático provee información para evaluar si el abandono de Cantona fue debido a un cambio climático drástico?

## 1.3 Objetivos

### Objetivo Principal

El objetivo principal del trabajo es documentar la variación climática y ambiental en el centro de México en el último período glacial ocurrido hace (10 000 años), a través de el registro magnético presente en sedimentos del lago Aljojuca, utilizando técnicas de magnetismo ambiental.

### Objetivo secundario.

Aportar datos para la curva de variación secular para el Holoceno en México

## 1.4 Metas.

Obtener núcleos de sedimentos de lago, que cubran un tiempo de 10 000 años o más.

Realizar mediciones de susceptibilidad magnética en muestras seleccionadas apartir de esos núcleos.

Obtener curvas de histéresis magnéticas, para determinar los siguientes parámetros:

Magnetización de saturación.

Fuerza coercitiva

Realizar mediciones de magnetización remanente isotérmica.

Obtención de curvas termomagnéticas para la determinación de temperaturas de Curie.

Obtener un modelo de edad del núcleo en estudio.



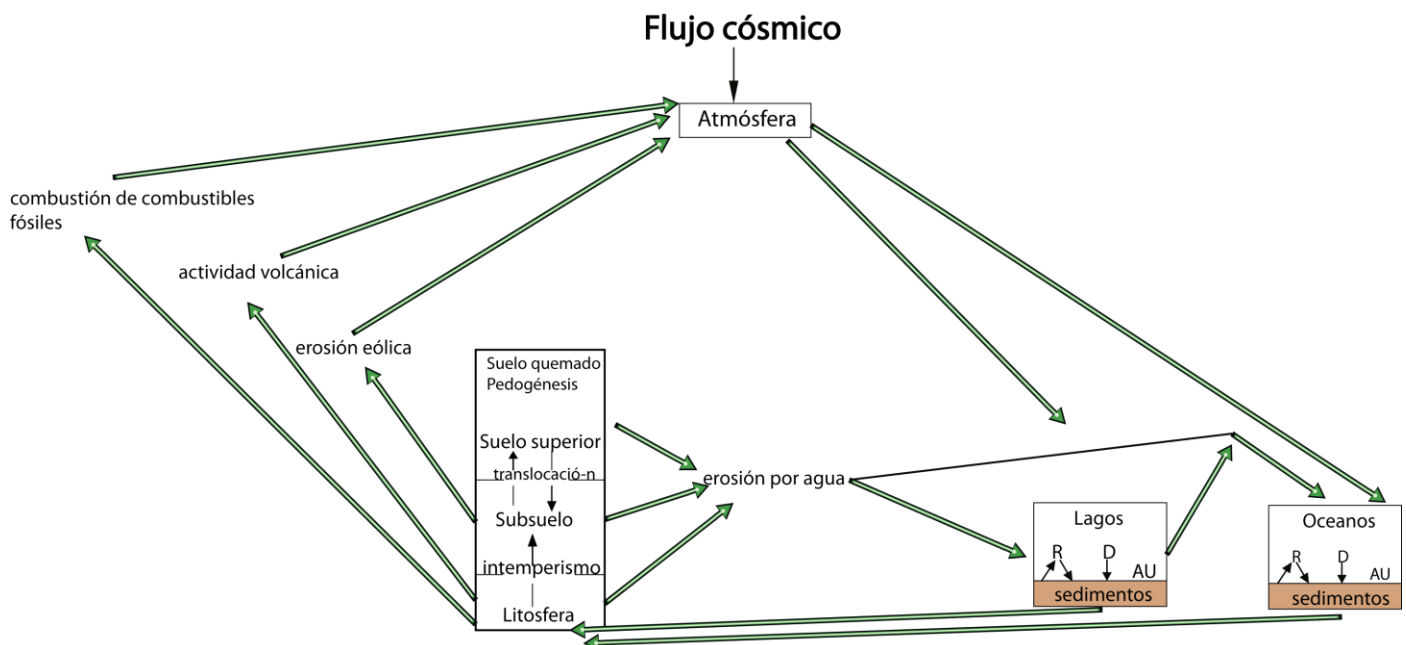
## CAPÍTULO 2

### Generalidades del magnetismo ambiental.

#### 2.1 Introducción.

La primera descripción de magnetismo ambiental como tal, apareció en 1986 por Thompson mostrando como los parámetros de minerales magnéticos pueden ser usados en un amplio rango de estudios ambientales como se observa en la Figura 2.1. Oldfield (1991) describe al magnetismo ambiental como la utilización de propiedades magnéticas, para conocer el origen, proveniencia, tamaño de los cristales magnéticos y correlacionar estos con cambios ambientales o antropogénicos. En la Tabla 2.1 se describen los principales parámetros magnéticos utilizados para definir la mineralogía magnética, así como los minerales magnéticos mas comunes encontrados en la naturaleza.

Los estudios de magnetismo ambiental pueden llevarse a cabo en diferentes materiales como rocas, sedimentos, suelos, partículas atmosféricas, materiales biológicos (Verosub, 1995), ya que todos estos materiales contienen una cantidad considerable de partículas óxidos de hierro.



**Figura 2.1.** Figura que describe el flujo de partículas magnéticas, por diferentes agentes de transporte así como los distintos procesos naturales y antropogénicos que las originan. La

letra R indica redepositación de los sedimentos, D es la depositación y AU es la autogénesis (modificada de Thompson,1986)

<b>Antiferromagnético</b>	<b>Materiales con spines atómicos anti-paralelos en los planos de una red cristalina, generando un momento magnético cero.</b>
Antiferromagnetismo con dominio defectuoso.-	Materiales que pueden tener un momento magnético si los spines no están compensados, debido a defectos en la red cristalina.
Atiferromagnetismo con momento inclinado	Materiales donde sus spines atómicos no se encuentran perfectamente alineados, teniendo una inclinación de pocos grados.
Diamagnetismo	Materiales que exhiben una magnetización negativa al aplicar un campo magnético externo. Esta magnetización desaparece al momento de remover el campo.
Dominio magnético	Un material magnético puede ser dividido en regiones en las cuales la magnetización es uniforme. Estas regiones son conocidas como dominios magnéticos
Dominio múltiple	A las partículas donde existen series de dominios magnéticos separados por paredes de Bloch son conocidas como multidominio.
Dominio sencillo	Por debajo de un cierto tamaño no es favorable subdividir en dominios magnéticos a la partícula, debido a que implica un gasto de energía extra. Entonces solo un domino es formado, a estas partículas se les conoce

	como de dominio sencillo
Ferromagnetismo	Materiales con existe una remanencia magnética debido a la energías de intercambio, otra característica de estos materiales es que el momento magnético es más grande que el de los materiales diamagnético y paramagnéticos
Ferrimagnetismo	Materiales magnéticos con espines alineados anti paralelamente, pero la magnitud de sus momentos no es similar, uno con respecto a otro generando un momento magnético resultante
Greigita	Sulfuro de fierro ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ), ocurre en condiciones reductoras. Su temperatura de bloqueo es de $330^\circ\text{C}$ .
Hematita	Oxido de fierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), formando en condiciones oxidantes su color distintivo es el color rojo. La temperatura de Neel de la Hematita se encuentra entre los $675^\circ\text{C}$ , a los $275^\circ\text{K}$ ocurre un reordenamiento $-10^\circ\text{C}$ conocido como la transición Morin.
Magnetita	Oxido de fierro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) puede formarse a partir de oxidaciones de alta temperaturas, en las rocas sedimentarias es muy común que se encuentre de manera detrítica. La temperatura de Curie es de $580^\circ\text{C}$ , a temperaturas bajas de $-125^\circ\text{K}$ ocurre un reordenamiento se le conoce como la transición Verwey ocurriendo un cambio de sistema cristalográfico de cúbico a

	monoclínico
Mahemita	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Este mineral contiene la misma composición química que hematita pero la estructura es de spinel inverso como magnetita. La temperatura de Curie es difícil de determinar por que es metaestable ,a temperaturas altas sufre un cambio cristalográfico irreversible transformándola a hematita, consecuentemente existe un perdida de magnetización
Paramagnetismo	En estos materiales los momentos atómicos se alinean con un campo magnético externo exhibiendo una magnetización baja, pero al remover el campo esta magnetización se pierde
Pirrotita	Sulfuro de hierro (Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub> -Fe <sub>11</sub> S <sub>12</sub> ) este mineral ocurre en ambientes reductores. La temperatura de Curie de la Pirrotita monoclínica es alrededor 325 °C
Pseudo dominio sencillo	Tamaño intermedio entre partículas de domino sencillo y domino múltiple. Este tamaño muestra una fuerza coercitiva intermedia, y una Mr/Ms también intermedia, y se le da el nombre de pseudo dominio sencillo.
Superparamagnéticos	Tamaños de partículas entre 0.001-0.01µm. Estas partículas son muy sensibles a vibraciones térmicas inclusive a la producida

	por la temperatura ambiente.
Titanomaghemitas	Esta serie de minerales se presenta entre hematita e ilmenita, en Ilmenita las capas de $\text{Fe}^{2+}$ alternan con capas de $\text{Ti}^{4+}$ , átomos adyacentes de hierro están magnetizados antiparalelamente entre ellos.
Titanomagnetitas	Los minerales de esta serie tienen una estructura de spinel inverso, formando estructuras cúbicas con átomos de oxígeno, las soluciones sólidas se forman a los 800 °C, los dos principales minerales de esta serie son magnetita y ulvoespinel.
Ulvospinel	La estructura atómica del ulvoespinel es de spinel inverso como la magnetita, pero con diferente composición. Su fórmula general de ulvospinel es $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ .

**Tabla 2.1.** Tabla donde se muestra las principales propiedades magnéticas y los minerales magnéticos más comunes.

## 2.2 Orígenes de los minerales magnéticos.

Los minerales magnéticos pueden ser clasificados por su formación en primarios y secundarios. Los minerales primarios son los que provienen directamente de la desagregación de una roca madre (rocas ígneas comúnmente). Por procesos de erosión, transporte son removidos y depositados en lagos, cuencas oceánicas o suelos. Los minerales magnéticos secundarios son aquellos que se forman a partir de los minerales primarios a través de procesos químicos o biogénicos (Thompson y Oldfield 1986).

Los minerales que contienen Fe al interactuar con el medio ambiente pueden ser modificados por diferentes factores como:

Transformación química.- La principal modificación de los cristales por reacciones químicas es cambiar su estructura de paramagnética a ferri o antiferrimagnética, o pueden ocurrir procesos de cambios de anti o ferrimagnéticos a paramagnéticos. Todos estos procesos pueden ser constructivos, transformativos o destructivos.

Intemperismo físico.- Los procesos de erosión física y transporte que involucran agentes como agua, aire y hielo convierten a la roca madre en detritos, pueden afectar a los cristales magnéticos de la roca, modificando su tamaño y forma por lo tanto los parámetros magnéticos también son alterados.

Erosión y transporte.- Debido a los procesos de erosión y transporte de sedimentos las partículas ya sean magnéticas y no magnéticas pueden sufrir procesos de selección de tamaño, modificando las propiedades magnéticas como tales.

Concentración y dilución.- Existen varios procesos que pueden afectar la concentración y dilución de la mineralogía magnética, por ejemplo los minerales que se encuentran en una roca serán más resistentes a los que se encuentran en un suelo, por los diversos procesos químicos y biológicos, los procesos de dilución y concentración solo afectan a parámetros como la susceptibilidad y la remanencia (Thompson y Oldfield 1986).

También las erupciones volcánicas pueden a través de sus nubes piroclásticas aportar óxidos de hierro que pueden quedar suspendidos en la atmósfera o ser depositados. Las actividades humanas generan partículas magnéticas debido a la combustión de combustibles fósiles y las industrias de producción de acero.

### **2.3 Minerales magnéticos en sedimentos de lago.**

El estudio del origen, transporte, transformación y acumulación de los sedimentos lacustres son útiles como herramientas para interpretaciones paleoambientales y de impacto antropogénico (Oldfield, 1991). Los sedimentos de lago son usados también para la reconstrucción de eventos históricos del pasado reciente, ya que a diferencia de los sedimentos marinos, la sedimentación es más rápida, en consecuencia los períodos de actividad humana tienen gran influencia. En la actualidad se han desarrollado diversas técnicas de datación para sedimentos recientes lo que ayuda aún más al estudio de eventos históricos a través de sedimentos lacustres.

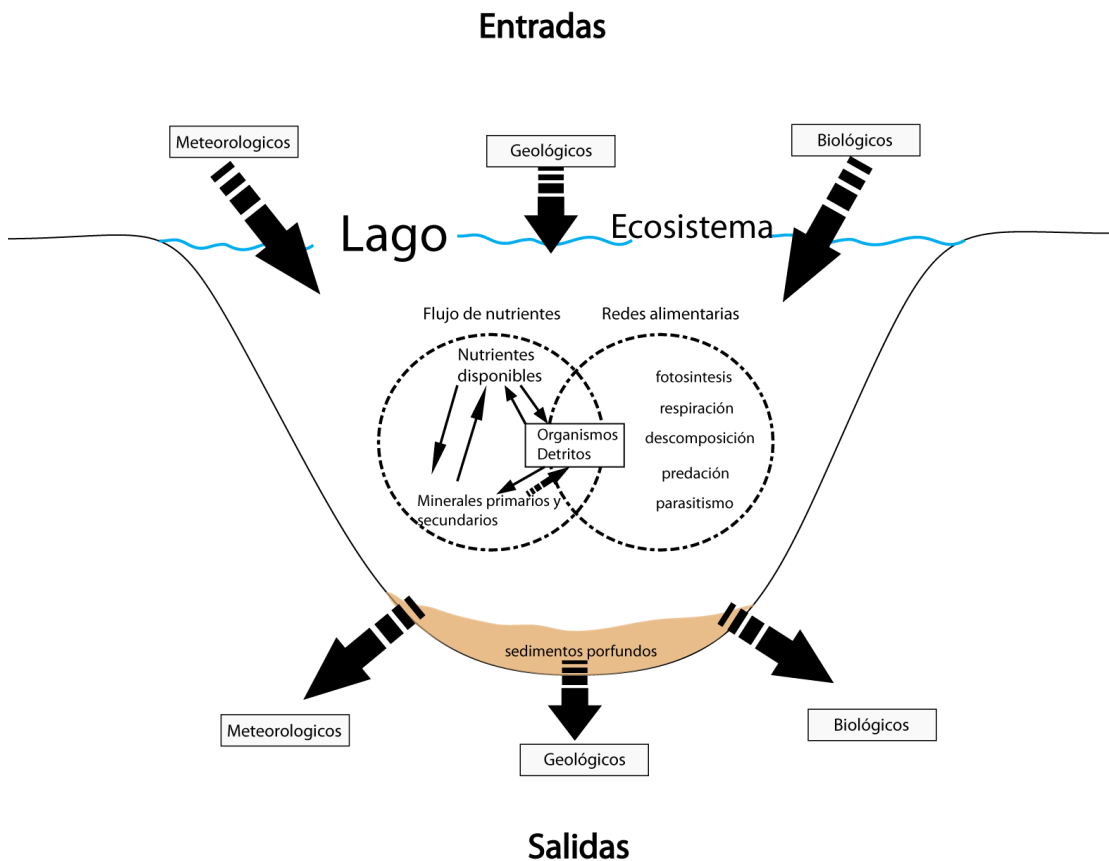
El material magnético que entra al lago y que se genera en el lago, puede ser clasificado en tres grupos, detríticos, autigénicos y diagenéticos. Los minerales detríticos son acarreados a la cuenca lacustre por diferentes agentes de transporte como el agua y viento, estos provienen de la desagregación de una roca madre preexistente. Los minerales autigénicos son los que se forman por procesos químicos y biológicos in situ después de su depositación, los diagenéticos son los cristales que se forman debido a la transformación de minerales magnéticos o no magnéticos en otro nuevo tipo de minerales (Thompson y Oldfield, 1986).

El origen de los minerales magnéticos en una cuenca lacustre depende de 4 fuentes principales (ver Figura 2.2):

- 1.- Material geológico producido por erosión de rocas, suelos y sedimentos circundantes
- 2.- Partículas transportadas por aire, ya sean producto de erupciones volcánicas, aerosol o partículas generadas por la industria debido a la combustión de combustibles fósiles.
- 3.- Minerales autigénicos se forman durante la depositación cuando existen condiciones químicas en el lago, todo esto depende de las condiciones de pH o redox que se encuentren en el lago. También son formados dependiendo la

productividad del lago, que se relaciona directamente con la cantidad de nutrientes disponibles.

4.- Biológicos.- En los lagos existen diferentes tipos e bacterias que a través de sus procesos de metabolismo pueden generar minerales magnéticos como magnetita y greigita.



**Figura 2.2.** Modelo simplificado de la entrada y salida de partículas magnéticas un ecosistema lacustre y los procesos que pueden sufrir antes de ser depositados (modificada de Evans y Heller 2003)

Las dos primeras fuentes dependen directamente de las condiciones climáticas, y pueden reflejarse en la concentración, tamaño de partícula o el tipo de cristal magnético, la tercera fuente depende más de las condiciones del lago como la cantidad de nutrientes y también el clima (Evans y Heller 2003).

Thompson y Oldfield (1986) clasifican las fuentes de materiales magnéticos en cinco categorías como se observa en la siguiente tabla.



Tipo de Fuente	Localización de origen	Agente de transporte	Tipos de mineral magnético
Roca basal	Cuenca de lago	Corrientes de agua, movimiento de masas y acumulación a partir del viento	Magnetita, hematita, pirrotita MD/SD
Suelos	Alrededor de cuenca	Corrientes de agua, movimiento de masas y acumulación a partir del viento	Magnetita impura, mahemita SD/SP
Ceniza volcánica	Alrededor de cuenca de lago	Corrientes de agua, movimiento de masas y acumulación a partir del viento	magnetitas
Combustible fósil e industria	Cuenca de lago	Corrientes de agua, movimiento de masas y acumulación a partir del viento	Magnetita impura Hematita Magnetita Gregita
Sedimentos de lago	Cuenca de lago autogenéticos, post-deposicionales in situ	Corrientes de agua, movimiento de masas y acumulación a partir del viento	Magnetita impura Hematita Magnetita Gregita

**Tabla 2.2.** Muestra las diferentes fuentes de proveniencia, locación de origen, agente de transporte y tipo de minerales magnéticos (tomada de Thompson y Oldfield 1986).

## 2.4 Magnetización remanente en sedimentos lacustres.

Una ventaja que ofrecen los sedimentos lacustres es el registro de alta resolución de la variación secular del campo magnético. A continuación se describen brevemente los procesos y mecanismos que influyen en la adquisición del magnetismo en los sedimentos lacustres.

### 2.4.1 Magnetización remanente natural (NRM).

La magnetización remanente natural (NRM por sus siglas en ingles) es la registrada en rocas o sedimentos. La NRM también se puede definir como la suma de varias componentes de magnetización incluyendo la característica en una roca o sedimento. La NRM se forma de varias componentes, la magnetización característica, es la adquirida en el momento de formación de

la roca y la magnetización secundaria es obtenida por cambios químicos en la roca, exposición a descargas eléctricas de rayos y exposición prolongada a un campo magnético. Existen varios tipos de NRM como la magnetización remanente térmica, magnetización remanente química, magnetización remanente isoterma y la magnetización remanente deposicional que es el mecanismo por el cual los sedimentos lacustres tienen un registro magnético.

### **2.4.2 Magnetización remanente detrítica**

Los sedimentos adquieren la magnetización de una manera muy diferente que las rocas volcánicas. Según el modelo de adquisición de magnetización en sedimentos de Nagata (1961) las partículas magnéticas suspendidas en agua adquieren la magnetización al orientarse con el campo magnético presente, pero necesitan suficiente tiempo para completar este proceso este tipo de magnetización se conoce como magnetización remanente detrítica deposicional. También los sedimentos pueden estar sujetos a modificaciones del registro magnético antes de su litificación por diferentes efectos como la bioturbación a este proceso se le conoce magnetización remanente post-deposicional. Al conjunto de procesos post y deposicionales se le conoce como magnetización detrítica. Debido a este proceso los sedimentos lacustres tienen un registro magnético.

### **2.4.3 Física del alineamiento de un momento magnético en medio viscoso.**

Las fuerzas físicas que interactúan con el alineamiento de un momento magnético en un medio acuoso pueden ser descritas de la siguiente forma:

Un momento magnético ( $m$ ) en presencia de un campo externo ( $B$ ) sufre un torque ( $\Gamma$ ) expresando de la siguiente forma:

**Ecuación 1** .....  $\Gamma = m \times B = mB \sin \theta$

Donde:

$\Theta$  es el ángulo formando entre el momento y el vector del campo magnético.

En un medio acuoso el torque es opuesto al arrastre de la viscosidad quedando definido por la siguiente ecuación:

**Ecuación 2**.....  $I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\lambda \frac{d \theta}{dt} - mB \sin \theta$

Donde:

$\lambda$ .- Es el coeficiente de viscosidad

$I$ .- Es el momento de inercia.

Omitiendo los términos de inercia tenemos:

**Ecuación 3**.....  $\tan \theta/2 = \tan \theta_0/2 e^{(-mBt/\lambda)}$

Donde:

$\theta_0$  .-Es el ángulo inicial entre  $m$  y  $B$ ,

**Ecuación 4**.....  $\lambda = 8\pi r^3 \eta$

$r$ .- Es el radio de la particular

$\eta$  .-Es la viscosidad del agua

La constante de tiempo  $\gamma$  de la ecuación sobre  $\theta_0$  reducido a  $1/e$  da como resultado:

**Ecuación 5**.....  $\gamma = \lambda / mB = 6 \eta / MB$

Donde:

$M$ .- Es la magnetización normalizada por el volumen.

Observaciones de laboratorio han permitido establecer que la DRM (Por sus siglas en ingles) es normalmente órdenes de magnitud menor a la magnetización detrítica de saturación (DRMs), y también es sensible a los cambios del campo geomagnético terrestre, esto es debido a que la

constante calculada en la ecuación 5 es mayor de la esperada lo que dificulta un registro de calidad del campo geomagnético.

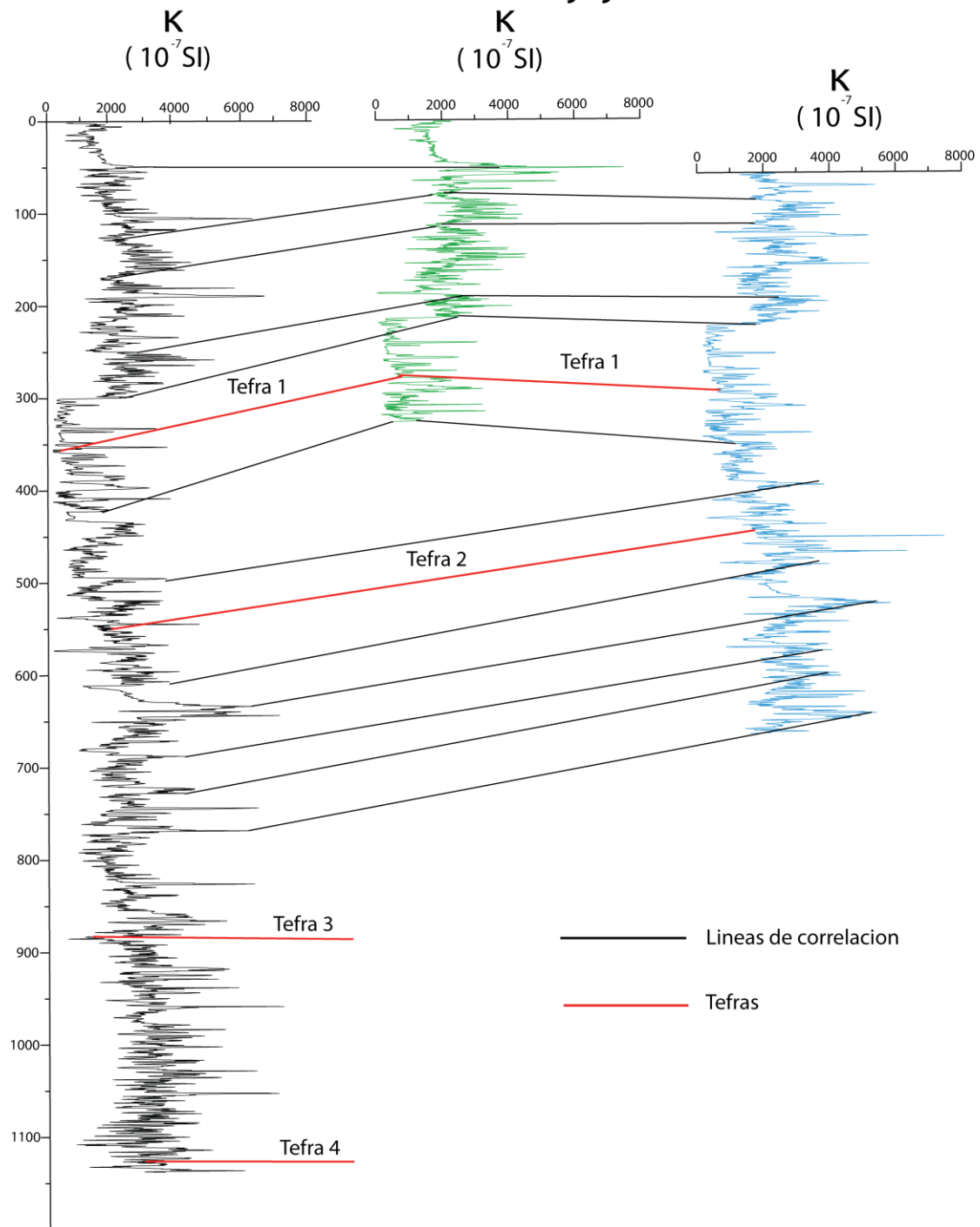
Existen dos mecanismos que también afectan el tiempo de adquisición de la DRM estos son: el movimiento Browniano y la floculación. Las partículas que son menores 100nm pueden ser afectadas por movimiento Browniano lo que genera partículas magnéticas que puedan girar libremente en un medio acuoso, afectando el registro magnético. Otro problema a considerar es que estas partículas necesitan un prolongando tiempo para alcanzar a depositarse.

En algunos ambientes acuosos como el salino las partículas magnéticas son floculadas aislando a la particular magnética del medio externo. Esto trae como consecuencia que se requiera una energía mayor del campo magnético para alinear estas partículas que muchas veces no se puede alcanzar.

## **2.5 Correlación.**

Otro uso que se le puede dar a los sedimentos lacustres a través del estudio de la mineralogía magnética es el de la correlación estratigráfica. Esta correlación se realiza midiendo parámetros que dependan de la concentración de minerales magnéticos como la susceptibilidad magnética, magnetización remanente anhística (ARM) (Por sus siglas en ingles) y magnetización remanente isotermal (IRM) (Por sus siglas en ingles) ayudando establecer similitudes o diferencias entre varios núcleos de un mismo lago. En la Figura 2.3 se observa la correlación de los tres núcleos del lago Aljojuca a partir del registro de susceptibilidad magnética.

### Correlación Aljojuca



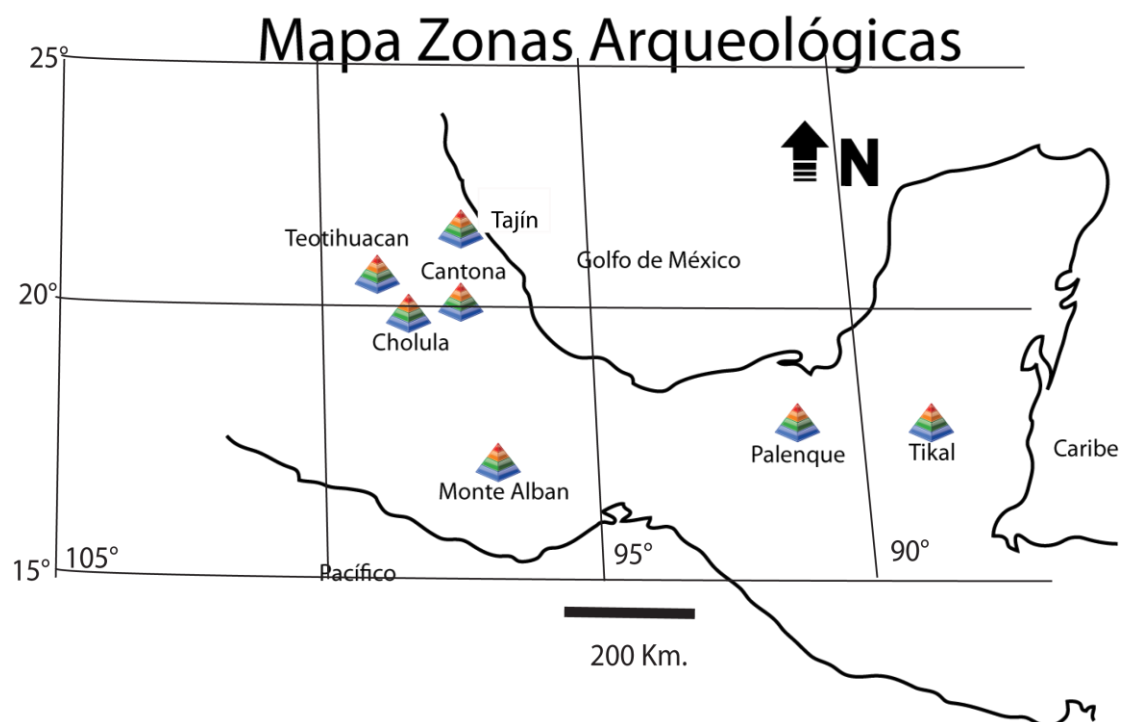
**Figura 2.3.** Correlación estratigráfica a través de registro de susceptibilidad de alta resolución de los núcleos Tlaloc, Ajalapazco y Oriental pertenecientes al lago Aljojuca.

## CAPÍTULO 3

### Antecedentes climáticos e históricos de Serdán Oriental.

#### 3.1 Arqueología del área.

En la Cuenca de Serdán Oriental se tiene registro de presencia humana desde el año 600 a.C., caracterizado por el establecimiento de pequeñas villas o poblados; Cantona es el sitio arqueológico más grande descubierto en esta zona a comienzos de 1900 (García y Martínez, 2008).



**Figura 3.1.** Mapa de ubicación de la zona arqueológica de Cantona, donde se muestran sitios arqueológicos principales del centro y sur de México.

### **3.1.1 Zona Arqueológica de Cantona.**

La zona arqueológica de Cantona se localiza en el municipio de Tepeyahualco, Puebla. Sus coordenadas geográficas son, 19°32'10" de latitud Norte, 97°28'15" de longitud Oeste, con una altura mínima de 2475 msnm y la máxima 2600 msnm (ver Figura 3.1). El sitio arqueológico tiene una extensión de 1400 ha. El clima que existe en esta zona es templado y seco con una precipitación media anual de 700 mm principalmente entre los meses de mayo a septiembre y una temperatura media anual de 16 °C. Otra característica del sitio arqueológico es que encuentra sobre flujos de lava del Pleistoceno, de composición basáltico-andesítica. Rasgos importantes de esta ciudad propuestos por García (1996) son la existencia de mas de 4000 calles y 25 juegos de pelota, lo que demuestra un alto urbanismo y también un alto nivel de organización de esta cultura.

A partir de la cuantificación de las construcciones habitacionales y fechamientos de C14 ha sido posible la estimación del número habitantes en diferentes épocas y ha sido posible establecer 4 etapas de ocupación de la ciudad. Estas se describen a continuación.

Cantona I (600 a.C a 50 d.C).- Inicialmente Cantona sólo fue un pueblo con algunas villas, alrededor establecidas en el 600 a.C, a los 300 a.C. inicia el apogeo de la ciudad, siendo habitada por alrededor de 10 000 personas en sus primeras etapas de población. Se conoce poco sobre esta etapa, solo existen algunas cerámicas y figuras que han servido para fechamientos.

Cantona II (50 a 550-600 d.C).- Para el 300 d.C existieron un total de 50 000 habitantes, marcado por la mayor expansión de la ciudad, modificando drásticamente el paisaje del área, debido al incremento demográfico muestra también una gran complejidad social.

Cantona III (550-600 a 900 d.C).- Para los años 600 y 700 d.C existieron un total de 90 000 habitantes, el máximo número de habitantes alcanzado en Cantona (García y Martínez 2008).



**Figura 3.2.** Estructura piramidal de la zona arqueológica de Cantona.

Cantona IV (900 a 1000-1050 d.C.) La decadencia de esta ciudad inició a los 950 d.C. reduciendo drásticamente su población a 5 000 habitantes y entre los 1000 y 1050 d.C. la zona se encontraba totalmente deshabitada. La principal causa propuesta por García (1996), para el abandono de la ciudad prehispánica de Cantona son las intensas y prolongadas sequías registradas en la zona durante el período del post-clásico, causas similares por las que se piensa que ocurrió el colapso de las culturas Maya y Teotihuacana.



### **3.2 Erosión como factor de modificación del ambiente generado por las antiguas culturas.**

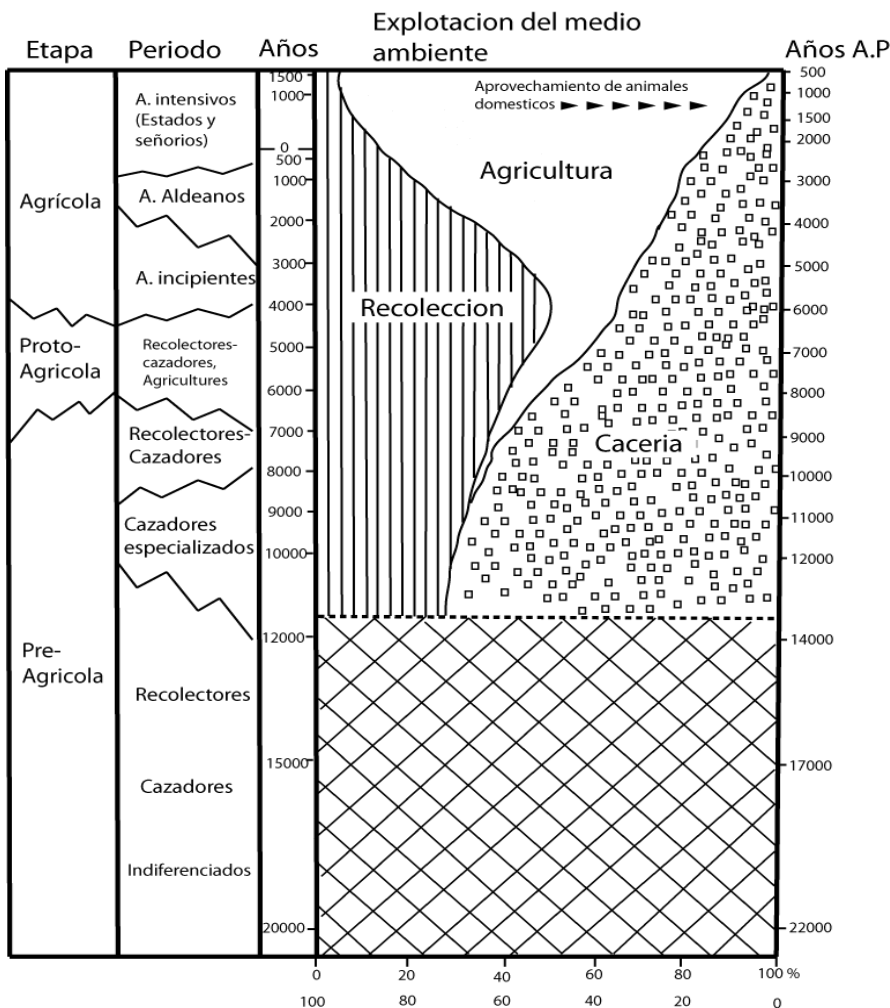
La erosión es un proceso físico que depende de varios factores como son el clima, la cubierta vegetal, la topografía y el uso de suelo. Dentro de los principales agentes erosivos se encuentran el agua, el viento y el hielo. La erosión depende en gran medida del tipo de suelo y el tipo de roca sometida en este proceso pero sin duda el ser humano puede afectarlo generando cambios en el paisaje y en el ambiente de manera drástica. Durante la época prehispánica los cultivos y las talas de bosques, fueron elementos que ampliaron el proceso de la erosión. Los antiguos pobladores tenían conocimiento de este fenómeno y realizaron diferentes técnicas de cultivo, como la construcción de terrazas en cerros, cultivo en chinampas y canales de riego para contener el efecto de la erosión.

En la zona de Puebla-Tlaxcala los primeros asentamientos datan de hace 12 000 años, pero la vida sedentaria de estos pobladores inició hace 4 000 años, con un tipo de agricultura primitiva. Los principales campos de cultivo se encontraban cercanos a arroyos o ríos. Para el año 1500 a.C. la población en esta zona aumenta, surgiendo nuevas técnicas como el terracedo. La población dependía en un 40% de cultivos y el otro 60% de diversas actividades como la caza, pesca y recolección (García, 1986). El aumento progresivo de la población, genera cada vez mayor dependencia de la agricultura como principal medio de alimentación. Para el año 800 a.C. el 60 % de la alimentación se abastecía de la agricultura mientras el otro 40% de otras actividades y para el año 400 a.C. alrededor del 70% de los alimentos se obtenían de la agricultura y el resto por el intercambio de productos (García, 1986).

La construcción de terrazas constituyó un avance en las técnicas de cultivo, ya que no solo generaba comodidad para el trabajo de la tierra, también evitaba la erosión, al no existir una pendiente pronunciada. La terraza lleva a que el agua meteórica se filtre de forma eficiente y evita que no se acarree gran volumen pendiente abajo (García, 1986). Con la llegada de los españoles en el siglo XVI, se pierde el control sobre el impacto de la erosión

principalmente por la reducción de la población y con esto la mano de obra para el mantenimiento de las terrazas. Existen notables incrementos de tasas de erosión en el centro de México, debido al desmonte de mayores cantidades de terrenos, introducción de nuevas técnicas de cultivo como el arado, la ganadería y, pastoreo, se destruyen las la destrucción de pequeñas terrazas, para obtener terrenos de mayores dimensiones y se introducen nuevos cultivos como papa, trigo y cebada, rompiendo el frágil equilibrio antes generado, Butzer (1992) (ver Figura 3.3) menciona que este tipo de estas actividades generan un tipo de erosión más destructiva Heine (2003), propone la siguiente relación:

Menos gente= menos agricultura → recuperación de bosques y arbustos → menos erosión.



**Figura 3.3.** Esquema que muestra la participación de la recolección, agricultura y cacería en las diferentes etapas y períodos de ocupación en la zona de Puebla Tlaxcala (Tomada de García, 1986).

### 3.3 Cambios climáticos de corta frecuencia.

Las últimas décadas evidencian un calentamiento global, según la IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, por sus siglas en inglés) reporta que la atmosfera actual contiene mas dióxido de carbono y metano que los últimos 650 000 años (IPCC, 2007). El aumento del dióxido de carbono es por las grandes emisiones que la actividad de los seres humanos producen. Los cambios en el CO<sub>2</sub> atmosféricos puede resultar por procesos ambientales naturales o por simples actividades cotidianas, como la quema de combustibles fósiles pero, ¿cómo saber si en verdad el cambio global es generado por el factor antropogénico? La respuesta la encontraremos estudiando los cambios climáticos de corta duración en el pasado.

Estos cambios climáticos se encuentran en el período Holoceno que comprende los últimos 11 500 años hasta la época actual. Existe una gran cantidad de registros naturales y arqueológicos que muestran la modificación de actividades humanas o migraciones masivas debido al aumento de condiciones extremas para la supervivencia en un sitio. A continuación se describen los principales cambios climáticos y ambientales que tuvieron lugar en el Holoceno.

#### 3.3.1 Último máximo glacial – Holoceno temprano

El inicio del último gran período glacial que se tiene registro ocurrió entre los 21000 y 18000 años, período en el cual las capas glaciares ocupan un 30 % de la superficie terrestre (Hambrey y Alean, 2004). La retirada de las capas de hielo de las zonas continentales comienza a los 15 000, finalizando este período glacial a los 11,600 años. Algunos *proxys* como isótopos estables y foraminíferos sugieren que el incremento de temperatura fue 1°C por cada 100 años (Bell y Walker, 2005), este cambio de condiciones favorecieron el establecimiento de diversas culturas debido a las condiciones propicias para la agricultura.

El incremento de temperatura global que inició a los 15 000 años sólo fue interrumpido por un periodo frío entre los 12 800-11 500 años intervalo conocido como “Younger Dryas” en Norte America y el Oeste de Europa y “Loch Lomond” en las islas británicas. Algunas evidencias de este período frío han sido observadas en el norte y este de Europa. Incluyen evidencia de que vegetación de bosque fue reemplazada por vegetación de tundra y el avance de diversos glaciares en Europa. El cambio de temperatura de una época glacial a una interglacial incrementó el agua de deshielo drásticamente y esto redujo la salinidad y la densidad del agua en la superficie del Océano Atlántico causando la retroalimentación de la circulación de la termohalina y cambiando el clima a escala global.

Después del período Younger Dryas el incremento de temperatura continuó, observado en el rápido retiro de las capas glaciares Laurentiana y Fenoscadiana. En norte América registros de polen sugieren que este incremento de la temperatura ocurre entre los 11 500 y 11 000 años. Uno de los registros más completos sobre esta transición se encuentra en la Antártida. Los núcleos estudiados contienen estratificaciones de capas de hielo que muestran una resolución de dos años, mostrando que este episodio tuvo una duración de 1500 años con un incremento de temperatura de cinco a (Walker et al., 1999).

### **3.3.2 El óptimo climático**

Este período ocurrió entre los 9 000 y los 4 000 años es caracterizado por un incremento en la temperatura de forma global. Este incremento de temperatura fue mayor a lo que se observan en la actualidad y es mostrado por diversos indicadores paleoclimáticos que reflejan un incremento de uno a tres grados centígrados por encima de la temperatura promedio global actual (Bell y Walker, 2005).

En el Holoceno medio, se presenta el mayor incremento de temperatura, provocando sequías que afectaron a diversas sociedades alrededor del mundo. Existen evidencias de este incremento. Una de las evidencias más convincentes se encuentra en el núcleo de hielo “North GRIP”, tomado en

Groenlandia. El calentamiento se observa a través de la señal de isótopos de oxígeno donde se observó un incremento en la temperatura entre los 8 000 y 4 000 años con máximos termales en 7 500 A.P y 4 500 años A.P. (Johnsen *et al.*, 2001).

En regiones de Norte América datos de polen sugieren que hace 9 000 años las temperatura registradas eran superiores a las actuales, condiciones que se mantuvieron hasta los 6,000 años (Thompson *et al.*, 1993). Reconstrucciones paleoclimáticas con datos de polen en Marruecos, indican un incremento de temperatura y decremento de precipitación durante el verano hacia los 6 000 años  $^{14}\text{C}$  (Claussen *et al* 1999).

Reconstrucciones realizadas con base a niveles lacustres muestran condiciones secas entre el 8000 y 4000 años (Hammarlund *et al.*, 2003). Otro indicador ambiental que muestra condiciones áridas o de alta temperatura, así como períodos de vientos constantes, son dunas de arena fósiles. Bridgwater y Allaart (1997) proponen que hace 6 000 años las dunas se expandieron en zonas como el Sahara, la porción sur de Arabia, Noroeste de la India y la parte Norte de América del Sur.

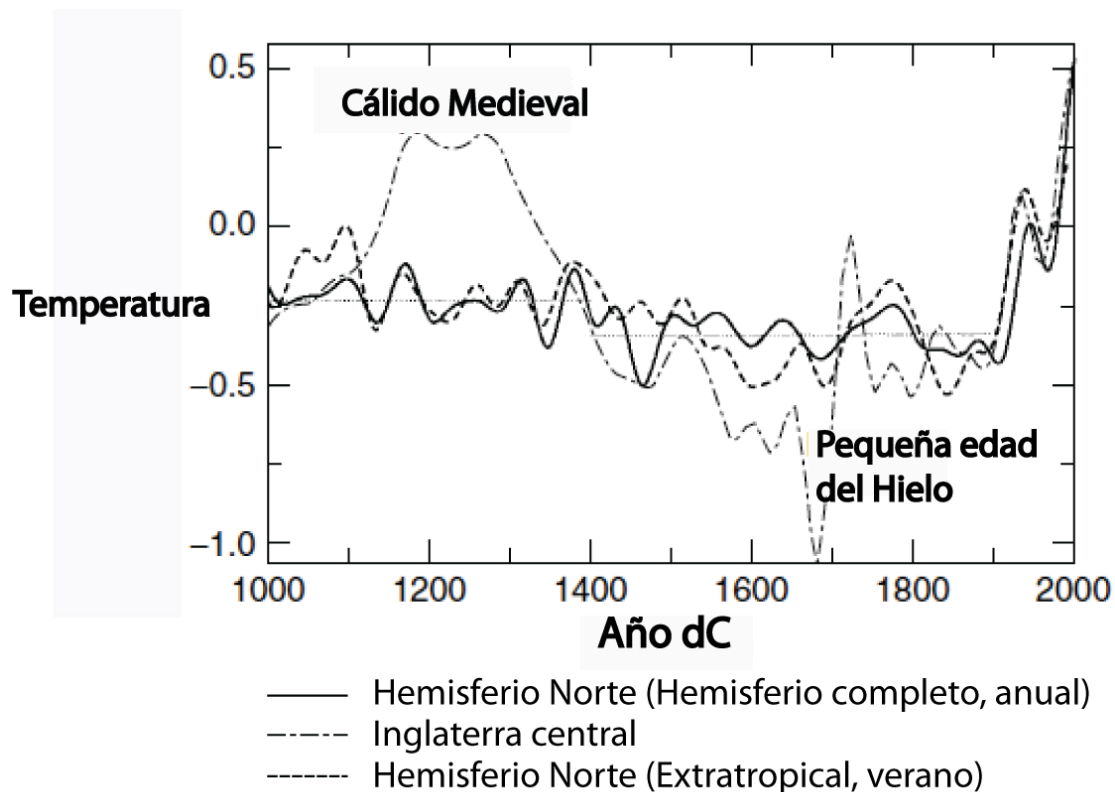
### **3.3.3 Deterioro climático del Holoceno tardío.**

En el Holoceno tardío debido al incremento de actividad humana y la modificación del medio natural es difícil reconstruir la historia climática con los indicadores como el polen y sedimentos lacustres. Este también ha sido uno de los principales problemas en México para la reconstrucción de eventos climáticos del Holoceno tardío (Park, 2005). Para obtener el registro climático de este periodo, se han estudio zonas donde no se tuvo impacto humano.

### **3.3.4 Período Cálido Medieval y la Pequeña Edad del Hielo.**

En el período entre los 900-1300 d.C. se registró, en Europa y regiones circundantes como el Atlántico Norte un incremento la temperatura por encima de la media actual del orden de 1 a 2 °C (Figura 3.4) Debido a estas condiciones climáticas la agricultura fue posible en altas latitudes y también permitió el establecimiento de asentamientos humanos. Este intervalo se conoce como el período Cálido Medieval. Grove y Switsur, (1994) proponen que existió retiro de glaciares de las montañas debido al incremento de la temperatura. Registros históricos muestran que los inviernos severos eran menos comunes. Otra evidencia fue que la reducción del hielo contenido en el océano, permitió el establecimiento de colonias vikingas en Groenlandia.

Núcleos de hielo de Groenlandia muestran que existió un incremento de temperatura de 1°C por encima de las actuales. Liski et al (1999) mencionan que debido a la incertidumbre de correlación entre varios indicadores climáticos que muestran variaciones de temperatura es difícil establecer que el calentamiento registrado en el siglo XX es mayor que el del período Medieval y viceversa. Otros autores señalan que este evento no se distribuyó de manera global y debe interpretarse como una anomalía local.



**Figura 3.4.** Variación en temperatura durante el último milenio de diferentes zonas, estas curvas fueron determinadas con diferentes indicadores climáticos y registros históricos. También, se muestra el cálido Medieval, la Pequeña Edad de Hielo y la media anual durante los períodos 1000 a 1400 d.C y 1400 a 1900 d.C. Imagen tomada de Mann, (2002).

Entre los siglos XVII y XIX la temperatura comenzó a decrecer alcanzando su mínimo en el siglo 17. Este período es conocido como la Pequeña Edad del Hielo, aunque existe una gran controversia sobre la distribución global de este decremento de temperatura. Bradley y Jones (1993) proponen que el descenso de temperatura fue menor de  $1^{\circ}\text{C}$  y esto solo ha sido bien documentado en el Hemisferio Norte. Las zonas donde este descenso de temperatura fue mas marcado fue el Atlántico Norte, y en el sector central de Europa por períodos de frío inusual y condiciones secas.

Ambos períodos, el Calentamiento Medieval y la Pequeña Edad del Hielo, aunque se ha reconocido que sus efectos son mas notables en el hemisferio norte, no existe una buena correlación entre espacio y tiempo de los diversos indicadores climáticos empleados, por lo que todavía no se puede establecer una relación de dichos períodos con los cambios climáticos actuales.

### **3.3.5 Causas de cambios climáticos en el Holoceno.**

Existen varias ideas generales sobre los mecanismos que generaron los cambios climáticos en el Holoceno, como las variaciones en el ciclo hidrológico, cambios en el nivel de mar, extensión de los glaciares, efecto de invernadero, cambios en la cantidad de energía solar que llega a la Tierra.

Crowley, (2000) propone que el 64% de los cambios climáticos generados en el Holoceno antes de una contribución antropogénica fue generado por la radiación solar y actividad volcánica, Berger (1988), muestra que alrededor de los 9 000 años A.P. el grado de inclinación del eje terrestre era mayor que el de ahora así el perihelio se producía en el mes de julio, esto provocaba una insolación más fuerte en el hemisferio Norte durante el verano.

### **3.4 Breve descripción del clima en México.**

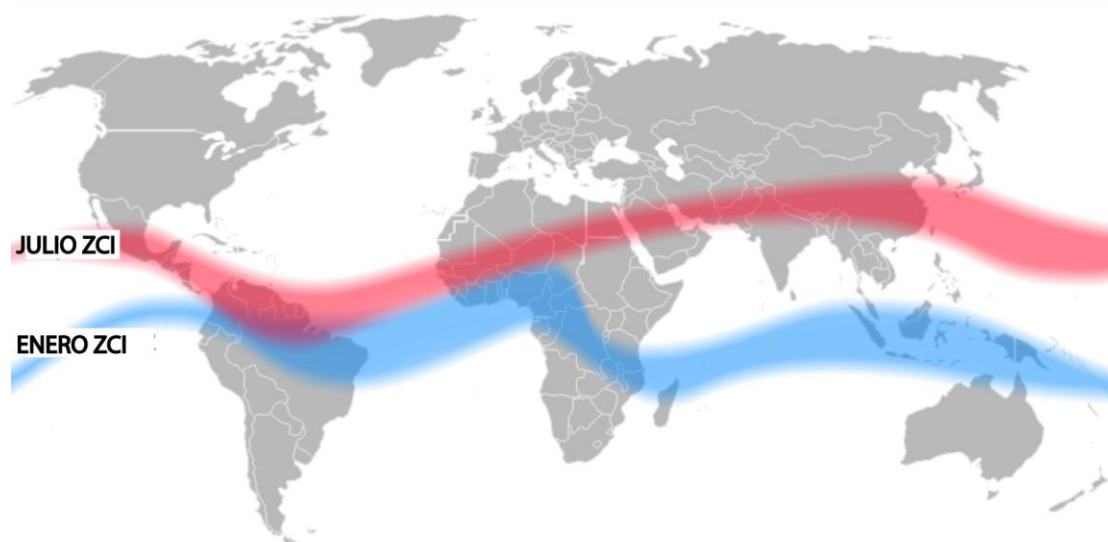
La posición geográfica de México, así como su orografía, son factores que propician variedad de climas del país. Existen tres factores climáticos que ayudan a producir esta variedad de climas. La corriente fría de California, dicha corriente recorre hacia el sur la costa del Pacífico, generando reducción en el nivel de precipitación en la costa de California y disminuyendo las temperaturas. La reducida precipitación también genera la mayor parte del desierto y semidesierto mexicano, en la porción Noroeste del país.

Otro factor es la calidez del agua del Golfo, el Caribe y los vientos alisios dominantes provenientes del Noreste, en conjunto esto genera en la costa este un clima tropical. El tercer factor afecta a la porción Norte del país, con masas polares que descienden desde el ártico canadiense, formando los llamados “nortes”. En invierno los “nortes” producen un descenso de temperatura y en ocasiones precipitación. Metcalfe, (2006) menciona que otro factor importante que modifica el clima actual en México, es la movilidad de la “zona de convergencia intertropical” (ITCZ por sus siglas en inglés). En la estación de invierno esta zona se encuentra en la posición sur, la mayor parte del territorio mexicano es dominado por altas presiones, favoreciendo condiciones secas (Figura 3.5).



El movimiento de la ITCZ en invierno, también genera precipitación en algunos sectores. En la porción noroeste existe precipitación durante el invierno en la costa oeste de Baja California. En la porción este, debido a las bajas presiones asociadas a las masas polares provenientes del norte, se recoge humedad del Golfo de México generando precipitaciones.

En verano la ITCZ se mueve hacia el norte estableciéndose un flujo de humedad del este de tipo ciclón y generando altas precipitaciones entre los meses de Junio-Septiembre altas en la mayor parte del territorio mexicano. Existen varias fuentes de donde proviene esta humedad, una es el Golfo de México, en el lado este, mientras que en el lado oeste, se establece el llamado “monzón mexicano” a lo largo de la costa norte del el Pacífico hasta el Golfo de California (Douglas et al., 1993) y por otro lado las tormentas provenientes del Pacífico y el Golfo de México también generan estas condiciones húmedas (Englehart y Douglas, 2001).

**Zona de Convergencia Intertropical**

**Figura 3.5.** Imagen que muestra las zonas intertropicales y su distribución global durante los meses de Enero y Julio (<http://climate.nasa.gov/>)

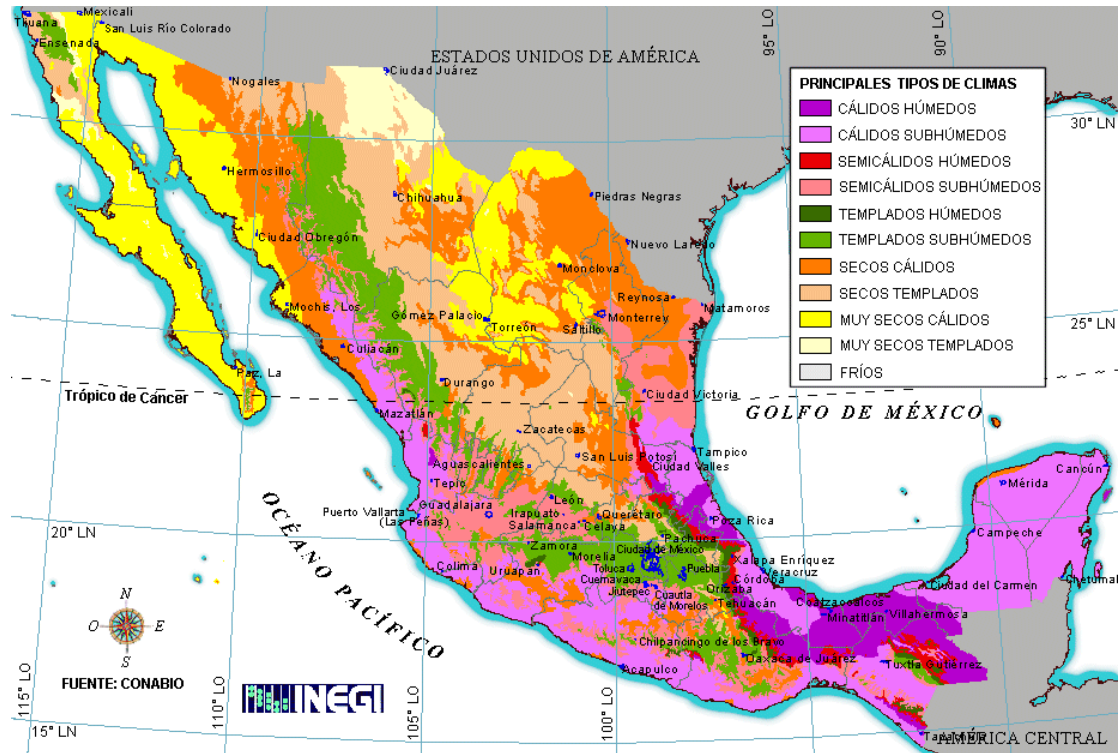
Por todos los factores anteriormente descritos los climas del país pueden clasificarse según su temperatura en: cálido y templado, mientras que de acuerdo a su humedad como: húmedo, subhúmedo y seco. El clima seco se encuentra en el 23 % de el país, con escasas precipitaciones durante el año, la tasa de precipitación anual es de 300 a 600 mm y las temperaturas promedio varían de 22 a 26 °C.

El clima muy seco se registra temperaturas que van de 18° a 22°C, con precipitaciones anuales de 100 a 300 mm, se encuentra en un 20.8 % del país.

El clima cálido se divide en cálido húmedo y cálido subhúmedo, el primero ocupa el 4.7 % del territorio nacional y se caracteriza por tener una temperatura media anual de 22° a 26 °C y precipitaciones anuales de 2,000 a 4,000 mm anuales. El clima cálido-subhúmedo 23 % del país y las precipitaciones anuales registrados son de 1000 a 2000 mm anuales las temperaturas oscilan entre 22° a 26 °C.

El clima templado se divide en húmedo y subhúmedo, el primero registra temperaturas de 18 ° a 22 °C, y una precipitación de 2,000 a 4,000 mm anuales comprende el 2.7 % del país. El clima templado subhúmedo se encuentra en el 20.5% de el país, las temperaturas oscilan entre 10 ° a 18 °C,

en algunas regiones la temperatura puede descender a 10 °C, la precipitaciones anuales son de 600 a 1000 mm en promedio durante el año.

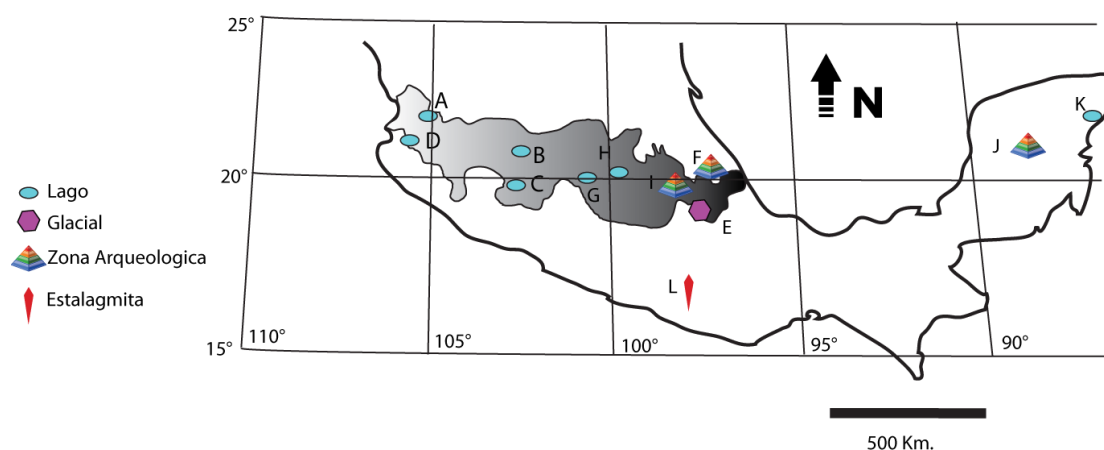


**Figura 3.6.** Figura donde se observan los principales climas de México y las zonas geográficas que abarcan (imagen tomado de [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)).

### 3.5 Registro climático para el centro de México.

A continuación se hace una recopilación bibliográfica de estudios sobre la historia climática y ambiental para el centro de México a través de diferentes indicadores climáticos. En la Figura 3.7 muestra la ubicación de las diferentes localidades utilizadas para la recopilación.

## Mapa de Ubicación de indicadores ambientales



**Figura 3.7.** Mapa de ubicación de los diferentes indicadores ambientales utilizados en la recopilación bibliográfica del presente trabajo. A) Santa María del Oro B) Piscina de Yuriria C) Lago de Pátzcuaro D) Laguna Juanacatlán E) Registros Glaciares F) Sitio Arqueológico de Cantona G) Hoya de San Nicolás H) Lago de Chalco I) Sitio Arqueológico Tlapacoya J) Sitio Arqueológico Maya K) Laguna Punta L) Estalagmita Juxtlahuaca

### 3.5.1 -Lago Santa María del Oro.

Vázquez et al. (2010) establecen los paleoclimas y paleoambientes a partir de un núcleo de sedimentos lacustres del Lago Santa María del Oro, localizado en la parte nor-occidental de la Faja Volcanica Trans-mexicana, en el estado de Nayarit a 65 km de la costa del Pacífico. El núcleo tiene una longitud de 8.8 m. El modelo de edades fue determinado con siete fechamientos C14, presentando una edad máxima en la base del núcleo de 2600 años A.P. que corresponde a una edad 600 A.C. Los sedimentos del núcleo fueron analizados con métodos del magnetismo ambiental para la determinación de la granulometría magnética, fluorescencia de rayos X para la determinación de elementos mayores y contenido total de materia orgánica.

El núcleo fue dividido en cinco zonas principales. En la zona V (600-180 A.C.) se observa condiciones de mayor humedad con intensas precipitaciones: en la zona IV (180 A.C. - 600 d.C) condiciones anóxicas y más cálidas, en la zona III (600 - 1140 d.C.) para esta zona se reportan mayor evaporación y condiciones secas, en la zona II (1140 - 1410 d.C.) las condiciones inferidas

son un balance de precipitación/evaporación con episodios secos y finalmente la zona I (1410 - 2002 d.C.) se muestran condiciones calidassecas. En resumen el núcleo indica condiciones variables en el Holoceno tardío, pero mostrando una transición hacia climas secos en el período Postclásico de la cronología arqueológica.

### **3.5.2 Lago de Páztcuaro y la Piscina de Yuriria**

Estos dos lagos fueron analizados con técnicas de isótopos estables y la geoquímica de elementos mayores (Mg/Ca). El registro de Yuriria es de 2600 años A.P. En el periodo comprendido entre 2300 y 900 años A.P se presentaron condiciones secas (Bridgwater, 1995 y Davies et al., 1995).

El registro del lago de Páztcuaro cubre un período de 3530 años A.P. Se identificaron cinco intervalos que oscilan entre períodos secos y períodos húmedos. Entre el período de 3530 y 2930 años A.P. se observa un decremento de  $O^{18}$  reflejando condiciones húmedas. El incremento de  $O^{18}$  muestran condiciones secas (mayor evaporación) para el período comprendido entre 2340-1330 AP, la fase seca termina marcado por un cambio rápido a condiciones húmedas entre el período de 1330-1190 A.P. retornando a condiciones secas entre 800 a 300 AP. De los 220 años A.P. hasta la época actual existen condiciones húmedas (Bridgwater, 1995 y Davies et al 1995).

### **3.5.3 Laguna de Juanacatlan.**

La laguna de Juanacatlan está localizada en el estado de Jalisco, cerca de la costa del Pacífico. De esta laguna Metcalfe (2010) se obtuvieron dos núcleos de sedimentos lacustres, que se combinaron para generar un núcleo compuesto con una longitud total de 7 m que representa una edad máxima de 2000 años A.P. (de acuerdo a modelo de edades generado con veintiséis edades radio carbón). Se tomó una muestra de canal de ambos núcleos y fueron escaneadas con XRF con una resolución de 200  $\mu\text{m}$ , para obtener las concentraciones de Ti, Mn, K, Ca y Fe. Los resultados fueron usados para explorar la variación geoquímica del núcleo y obtener interpretaciones ambientales. Se identificaron seis zonas principales donde se pueden

observar las variaciones en el contenido de estos elementos. De los resultados se infirieron períodos de sequías debido al bajo contenido de Ti (indicador de erosión) del 400-600 d.C. El período comprendido entre 700-900 d.C. que coincide con la parte inicial del período conocido como “Cálido Medieval”. Así como otros episodios recientes de sequía en los lapsos, 1450-1460 ,1550-1590, 1680 , 1760-1780 y por último 1830.3 (Metcalfe,2010).

### **3.5.4 Laguna Punta.**

Laguna Punta localizada en el estado de Quintana Roo, a 20 km al noroeste del sitio arqueológico de Cobá. De esta laguna se obtuvo un núcleo de sedimentos de 6.3 metros de longitud, con el fin de analizar la variación temporal de isótopos de oxígeno registrados en ostracodos y gasterópodos. También se hicieron mediciones de carbono orgánico, así como mediciones de pH de la columna de agua de la laguna y análisis de imágenes de la estratigrafía del núcleo. El modelo de edades se estableció con ocho fechamientos  $^{14}\text{C}$ , obtenidos a partir de material orgánico terrestre (carbón, madera y hojas). La edad máxima del modelo de edades es de 2840 años A.P (Hodell, 2005).

Los resultados que muestra este estudio son: en el período comprendido entre 1900 a 1500 A.C. existen capas con bajo contenido de Carbono indicando un nivel bajo en el lago. En el período de 2000- 100 años A.C. se infiere presencia humana debido al cambio de vegetación registrado en el análisis de polen del lago Cobá. Así mismo en el intervalo 1140-610 años A.C se registran niveles altos en lo que sugiere condiciones húmedas. De 535 a 550 años d.C. se registra un período seco , marcado por el bajo contenido de carbono y un incremento de  $\text{O}^{18}$ . Mientras en el periodo de 600 a 700 años d.C. se observan condiciones húmedas, mostrado por alto contenido de Carbono y decremento de  $\text{O}^{18}$ . Para este período se observó un crecimiento demográfico en ciudades prehispánicas como Cobá, que albergó a 55 000 habitantes y 20 000 estructuras urbanas. El periodo comprendido de los 750 a los 1050 años d.C. fue marcado por un periodo de sequía prolongado. El periodo comprendido entre 1050 a 1521 es marcado por condiciones húmedas (Hodell, 2005).

### 3.5.5 Registros de glaciares

Aunque el centro de México se encuentra en posición ecuatorial, existen estructuras volcánicas donde su altura permite el desarrollo de glaciares como el volcán Iztaccíhuatl con una elevación de 5636 msnm. Heine (1988), realizó estudios de secuencias glaciares en el centro de México en los volcanes, Popocatepetl, Pico de Orizaba, Nevado de Toluca, La Malinche e Iztaccíhuatl. Basado principalmente en edades de radiocarbono en el volcán La Malinche y, haciendo una correlación con Iztaccíhuatl, propuso cinco avances glaciares que corresponden a climas fríos. Otros trabajos como Nixon (1989) y Vazquez Selem (1991, 1997) basados en edades K-Ar y en observaciones de campo soportan la cronología de Heine, pero el estudio de Vazquez -Selem del volcán Teyotol no concuerda con la cronología de Heine. En México, todavía no existe un idea general de los episodios de avance glacial y es difícil por ello tratar de establecer condiciones climáticas con estos indicadores. El principal obstáculo es la falta de concordancia entre los fechamientos de los diferentes trabajos. Sin embargo, una vista general para el Holoceno permite observar dos avances de glaciares, uno comprendido entre 3500 a 2000 años A.P. y otro a los 1000 años A.P. Según Vázquez Salem (1997) las condiciones climáticas para el avance de glaciares deben ser de clima frío y húmedo.

### 3.5.6 Registros de polen

Existen diversos registros de polen para diferentes lagos localizados en el centro de México, uno de los más completos es el del lago de Pátzcuaro, obtenido de un núcleo de 15.2 m trabajo realizado por Watts y Bradbury, (1982) quienes reportaron una edad de 44,000 años A.P para la base del núcleo. La parte baja del núcleo comprende entre los 44,000 a 11,000 años antes del presente, se observa predominancia de pinus, con porcentajes menores de *Alnus*, *Quercus*, *Juniperus*, *Artemisa* y *Ambrosia*. Entre 11000 y 5000 años A.P se presenta un decaimiento de *Aliso* e incremento de *Amarantacea* durante los 5000 años A.P., interpretado como inicios de agricultura y un ligero cambio a condiciones áridas (Watts y Bradbury, 1982).

### **3.5.7 Sitio Arqueológico Tlapacoya.**

Localizada en la parte norte de la Cuenca de México la zona arqueológica estudiada por González Quintero (1986) tiene un control cronológico que fue obtenido con base en edades de radiocarbono a partir de muestras de secuencias sedimentarias del sitio. Con base en el registro de polen se establecieron siete episodios para observar la variación de precipitación y temperatura. Las fases que conviene analizar para este trabajo son la fase IV comprendida entre los 7500 a 4800 años A.P. interpretado como clima húmedo con una media anual de 20 °C y una precipitación mayor de 1400 mm. La fase V comprende entre los años 4850 a 4200 años A.P. donde se observa especies xerotróficas, interpretándose como condiciones secas. Después existe el retorno a condiciones húmedas en período VI que comprende entre 4200 a 2600 años A.P. y el último período comprendido entre 2600 a 1900 años muestra un incremento de polen herbáceo, interpretado como evidencia de presencia humana.

### **3.5.8 Lago de Chalco.**

En el estudio multidisciplinario realizado por Ortega-Guerrero et. al. (1992) del lago de Chalco se realizó a partir de un núcleo de 26.5 m de longitud. El control cronológico fue con cuatro edades de radio carbono que cubren una edad máxima de 20,600 años A.P. Para el período comprendido entre 10,000 a 5000 años A.P. se observó abundancias de *Quercus* y *Abies*, interpretados como temperatura subhúmeda, después de los 5000 años A.P se observa incremento de *Amarantacea*, interpretado como el inicio y la dispersión de la ocupación humana en la zona.

### **3.5.9 Hoya San Nicolás Guanajuato.**

Para el estudio del registro de polen de la hoya San Nicolás se obtuvo un núcleo de 5 m de longitud, el modelo de edades se estableció con cinco fechamientos de radiocarbono. El núcleo se dividió en tres zonas principales para su interpretación.



La zona tres que comprende de 9500-3700 años A.P., donde se interpretan cambios en el radio de *Pinus/Pinus+Quercus*, como subzonas 3a, 3b y 3c , donde se observa la alternancia de climas frío/seco en la zona 3a, para la zona 3b de calido/húmedo y en la zona 3c frío/seco.

La zona dos comprende una edad de 3700 -1100 años A.P la característica importante de esta zona es el incremento de radio *Pinus/Pinus+Quercus* y del tipo *Poaceae* , interpretándose como un clima cálido/seco.

La zona uno es marcada por el decremento de *Amarantacea*, *Astraceae* y *Zea* corresponde con la etapa de abandono diferentes culturas en el período Clásico tardío, el único incremento de polen en esta zona es de *Juniperus*, pudiendo indicar condiciones húmedas (Park,2005).

### **3.5.10 Estalagmita Juxtlahuaca.**

Las estalagmitas son un registro de alta resolución, tanto ambiental como cronológicas, en el estudio de Lachiet et al (2012) se utilizó una estalagmita tomada de la cueva Juxtlahuaca, ubicada en la Sierra Madre del Sur, obteniendo la concentración de isótopos de oxígeno para reconstruir las variaciones de precipitación. La edad máxima de este indicador ambiental es de 2300 años A.P.

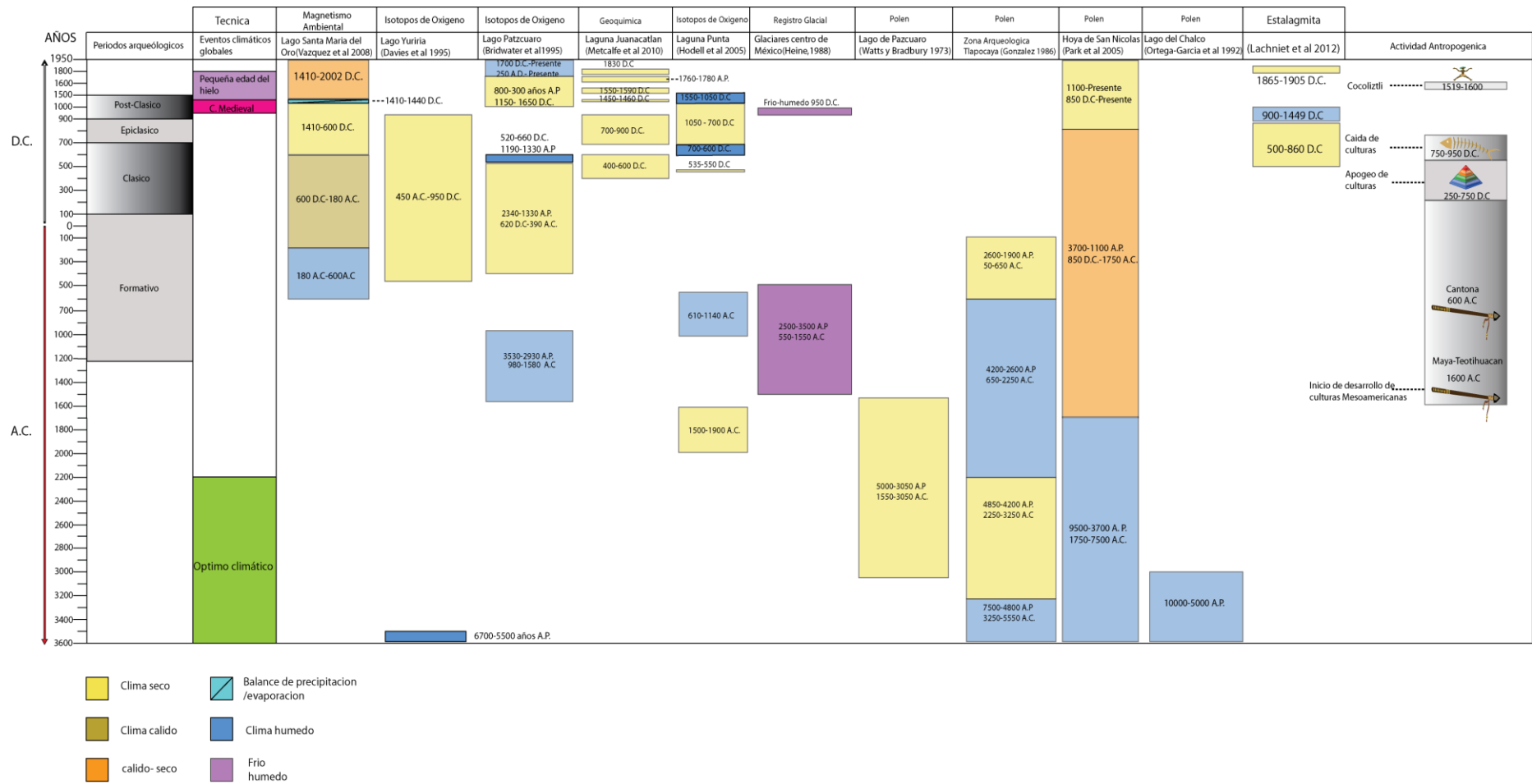
En los años 500 ,770 y 860 d.C se detectaron bajos niveles de precipitación por lo que se interpreta como períodos secos, mientras que para 900, 1150,1325 y 1449 d.C existió mayor precipitación, correlacionándolos con climas húmedos, para la época colonial se presenta predominancia en la poca lluvia, condiciones semejantes se reportan para los años comprendidos entre 1865-1905 estableciendo condiciones normales para el año 1920.

### **3.5.11 Actividad humana como indicador climático.**

Existen varias coincidencias entre diversas culturas mesoamericanas como en el período que estas florecieron, hasta como el período de su decadencia. Comparando dos culturas importantes mesoamericanas como fueron la teotihuacana y la maya con Cantona también es apreciable estas similitudes. La cultura Teotihuacana y Maya se establecen entre los años 3000 a 3500

años A.P en el período arqueológico conocido como formativo (Hodell et al 1995, Curtis et al, 1996, Rivera et al., 2007) mientras que Cantona se establece a los 2500 años A.P según García y Martínez (2005). El apogeo de estas civilizaciones fue alcanzado entre los años 600 y 700 d.C. marcado por incremento de población. La ciudad de Cantona albergó a 100000 habitantes según García y Martínez (2005) mientras que Teotihuacán 125000 habitantes (Milon, 1967) . El declive de estas civilizaciones comenzó a partir de los 750 hasta los 950 d.C. Este último evento es asociado con una sequía.

En la época colonial otro evento de sequía se tiene registrado entre los años 1519 y 1600 años A.P. considerado uno de los peores desastres demográficos para México reduciendo la población drásticamente. El número de decesos se estima entre 10 a 30 millones de habitantes (Acuña et al 2005). Otra hipótesis sugiere que dicha sequía agudizó la propagación de epidemia conocida como Cocoliztli. Sequías recientes fueron documentadas para los siglos XVII, XVIII y XIX.



**Figura 3.8.** Tabla de los diferentes indicadores climáticos utilizados para ser comparados con el registro del lago Aljojuca, así como eventos históricos importantes posiblemente relacionados con cambios ambientales y climáticos.

## **CAPÍTULO 4**

### **Entorno geológico del área de estudio**

#### **4.1 Introducción.**

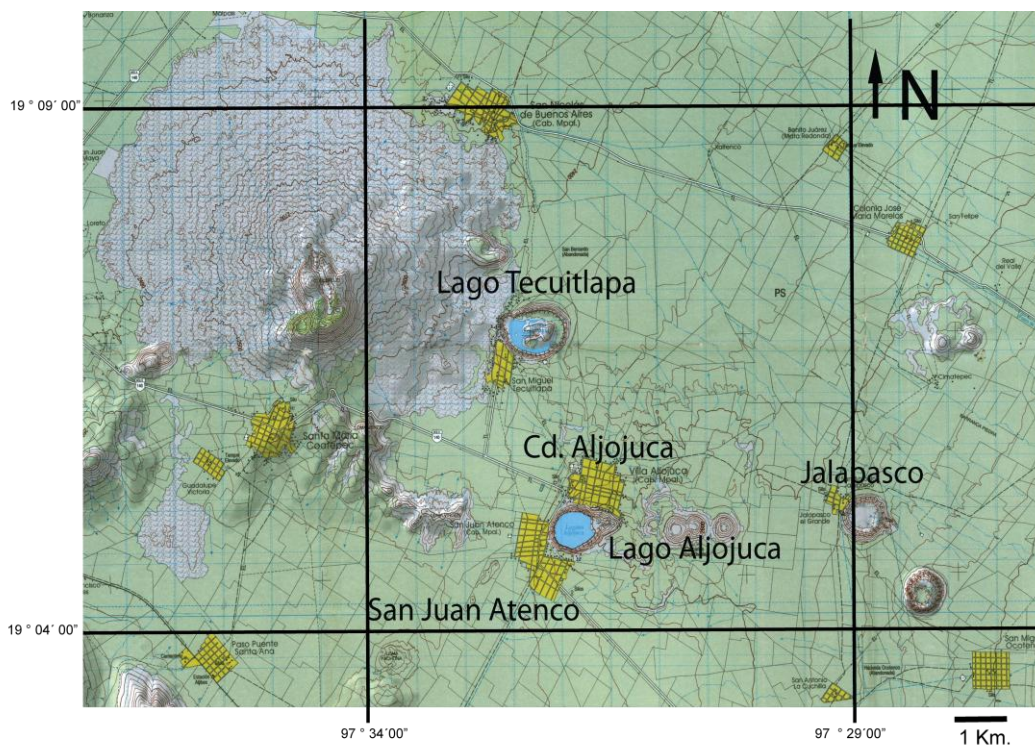
El lago Aljojuca según la clasificación de Lorentz (1986) es un Crater Maar debido que se puede observar su roca pre-maar expuesta y sobre ella una secuencia vulcanoclástica.

También conocer el entorno geológico local donde se ubica el lago en estudio, es importante debido a que este funciona como una micro cuenca, en la cual se depositan sedimentos productos del intemperismo físico de las diversas litologías de los alrededores. Para realizar una interpretación de los paleoambientes y paleoclimas, es necesario conocer el origen, tipo y procedencia de dichos sedimentos.

En el caso del cráter maar Aljojuca la mayor parte de los sedimentos depositados provienen principalmente del edificio volcánico y de las diferentes estructuras volcánicas de la zona. A continuación se describe la ubicación del lago Aljojuca, sus rasgos fisiográficos, hidrografía y la geología local de sus alrededores.

#### **4.2 Localización del Área de estudio.**

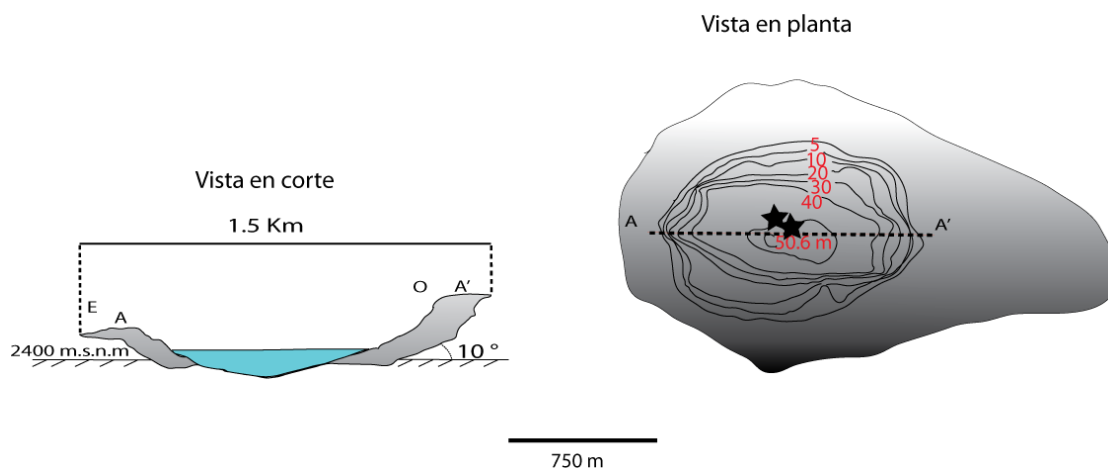
El lago Aljojuca se localiza entre los municipios de San Juan Atenco y Aljojuca pertenecientes al estado de Puebla, fisiográficamente se encuentra en el Sureste de la Cuenca de Serdán Oriental, sus coordenadas son 19°05'30" latitud norte y 97°31'59" longitud oeste, con una altitud de 2377 m.s.n.m. (Figura 4.1).



**Figura 4.1.** Mapa de localización del lago Aljojuca, ubicado entre los municipios de Villa Aljojuca y San Juan Atenco.

### 4.3 Rasgos fisiográficos del cráter Aljojuca

El cráter maar Aljojuca muestra una pendiente externa de 10°. El cráter tiene una forma elíptica, su eje mayor es de 1.5 km y eje menor es de 1 km. Esta forma es debido a que en el flanco Este del cráter existe un derrumbe, probablemente asociado a la inestabilidad de la estructura volcánica. Su área superficial es de 0.44 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima 50.6 m. Otro rasgo importante en la zona, son los tres conos de escoria que se encuentran perfectamente alineados con el maar Aljojuca con un rumbo Este-Oeste (Gasca, 1981).



**Figura 4.2.** Vista en corte en planta y batimetría del Crater Maar Aljojuca. La distancia que existe en el eje mayor es de 1.5 Km mientras que en el eje menor es de 1 km y su profundidad máxima es de 50.6 m. Las dos estrellas negras muestran los lugares donde se perforaron los núcleos (Modificada de Gasca 1981).

#### 4.4 Hidrografía

La Cuenca de Serdán Oriental es un cuenca endorreica; esta cuenca presenta al centro dos lagunas efímeras El Salado o Tepeyahualco y El Carmen o Totolcingo. Estas, permanecen secas la mayor parte del año, la alta permeabilidad de los materiales litológicos que constituyen la Cuenca de Serdán Oriental no permite que se originen corrientes o arroyos definidos, sólo se generan en temporadas de lluvias. Los únicos rasgos hidrográficos importantes son los cráteres maar presentes, divididos en dos grupos principales:

- 1) Quechulac, Alchichica, La preciosa y Atexcac se encuentran en la zona de transición de clima semiárido a templado, en la porción norte.
- 2) Aljojuca y Tecuítlapa, en la porción sur caracterizados por clima subhúmedo,

La característica común que muestran estos lagos es que son de composición alcalino (Caballero et al 2003). Los lagos efímeros son alimentados por agua meteórica mientras que los lagos cráteres tipo maar por agua subterránea (Gasca, 1981). En el lago Aljojuca no es alimentado por una corriente de agua permanente, sólo corrientes temporales formadas

durante temporadas de lluvia. La mayor parte de estas corrientes se encuentra en el flanco Este, generando un pequeño abanico aluvial.

#### **4.5 Vulcanismo de Sérdan Oriental.**

El vulcanismo en Sérdan Oriental comenzó en el Mioceno medio-tardío, con vulcanismo efusivo. Los primeros derrames fueron de composición andesítica. Los flujos más jóvenes tienen una edad de 10.5 Ma, extruidos a través de fracturas en la Sierra de Tlaxco, los últimos flujos datan del Plioceno tardío. Los primeros derrames basálticos en la Cuenca de Serdan Oriental tienen una edad de 2.8 Ma y fueron extruidos a través de fracturas con dirección NW-SE. (Yañez y García 1982)

El Cerro Pizarro y el Xalapazco fueron producto de actividad ígnea félsica, comenzando hace  $1.6 \pm 0.3$  Ma y dando origen a otros domos como El Cerro Pizarro, El Xalapazco, Oyameles, estos extruyeron a través de fracturas con rumbo N-S. Otra actividad ígnea importante en esta zona, fue el emplazamiento de flujos piroclásticos que cubrieron las regiones NO, N y NW, provenientes de la Caldera de los Húmeros, debido a la gran cantidad de material extruido, se generó un vacío en la cámara y posteriormente un colapso, así como fallas semicirculares, por las cuales extruyeron flujos andesíticos datos en 1.8 Ma. (Yañez y García 1982)

Algunos flujos más jóvenes fueron extruidos debido al intenso fracturamiento con dirección NW-SE en intersección con fracturas rumbo NE-SW en el centro de la cuenca como la caldera de Los Húmeros datada en 480 000 años y las Derrumbadas de composición riodacíta, datado en 320 000 años. Por último el grupo de cráteres maar al cual pertenece el lago en estudio fueron generados por actividad freatomagmática en el Pleistoceno temprano. (Yañez y García 1982)

## CAPÍTULO 5

### Metodología.



**Figura 5.1.** Los puntos amarillos representan la ubicación de los núcleos Tláloc, Oriental y Ajalapazco en el lago Aljojuca.

### 5.1 Obtención de Núcleos del Lago Aljojuca.

Se obtuvieron tres núcleos del lago Aljojuca todos ellos de la parte central del lago. Estos núcleos se componen de varios segmentos, debido a que no fueron perforados de manera continua, el rango de longitud de los segmentos varía de 100 a 95 cm.

Los núcleos del lago Aljojuca fueron nombrados de la siguiente manera:

Núcleo Tláloc-6.- formado de trece segmentos con longitudes de 60 cm y el mayor de 100 cm, su longitud total es de 1174.2 cm



Núcleo Oriental-7.- formado de seis segmentos de 62.1 a 98.1 de longitud y un total de 469.5 cm

Núcleo Jalapazco-7.- formado de ocho secciones 24.8 cm a 89.9 cm de total de 670.3 cm.

### **5.1.2 Sistema de perforación**

El sistema utilizado para perforar los núcleos del lago Aljojuca, fue el sistema de perforación “Usinger” del tipo de “pistón estacionario” (Figura 5.2) según la clasificación de Wright et al (1965). Las partes principales de este sistema son las siguientes:

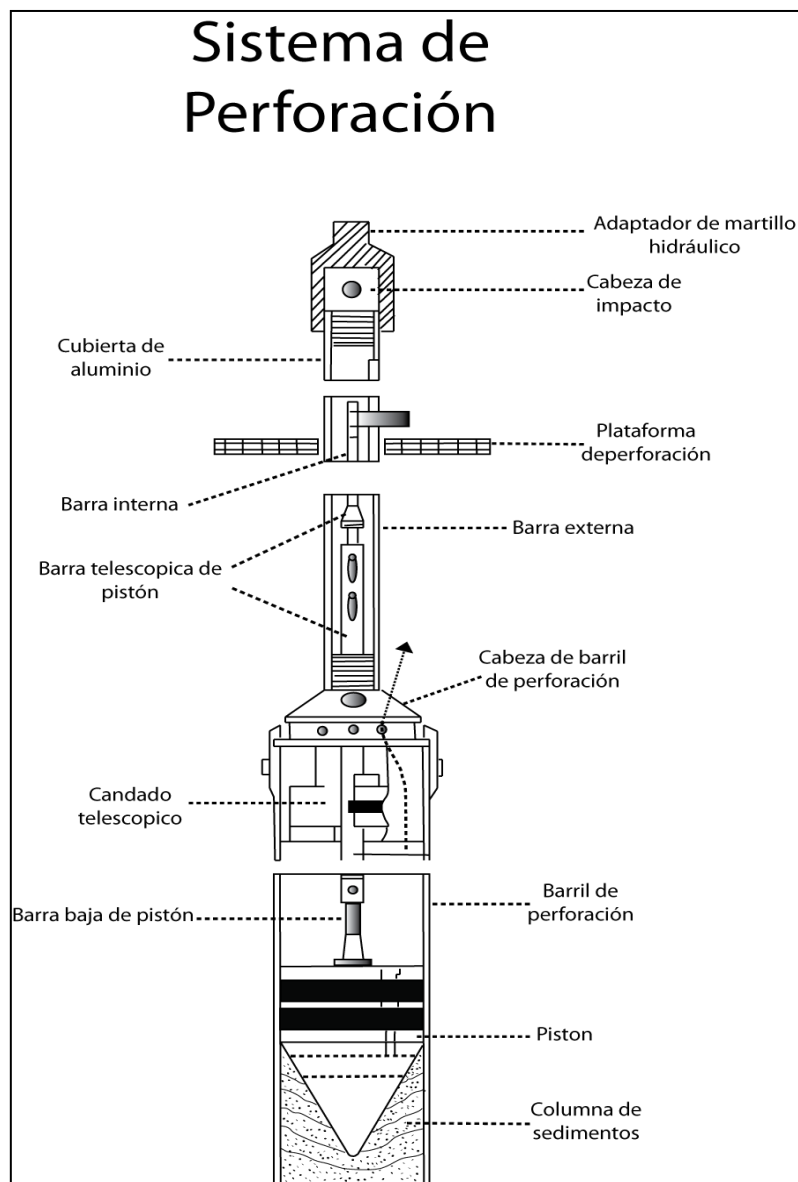
- 1.- Barril de perforación.- La función principal es de contener los sedimentos una vez que estos son perforados.
- 2.- Cubierta de aluminio.- Es la interfase entre la balsa donde se encuentra el equipo de perforación y la columna de sedimento-agua, también guía al barril de perforación al pozo.
- 3.- Barra interna y externa.- La barra externa tiene la función de acoplar la maquinaria hidráulica para transmitir la fuerza necesaria para la perforación. La barra interna tiene la función de detener y sostener el pistón
- 4.- Tubería de perforación.- Tubos de acero de paredes de 1 mm de grosor y con una longitud de 1 a 2 metros y sus diámetros varían entre 100, 80, 55 y 40 mm (Mingram et al., 2006). Para el lago Aljojuca se utilizaron diámetros de 60 a 80 mm.
- 5.- Pistón.- El pistón queda fijo en la tubería de perforación, se libera a una profundidad deseada quedando el tubo cerrado, por último este genera un vacío que evita que los sedimentos se deformen o perdidas del material recuperado.

El proceso de perforación se lleva a cabo en tres pasos principales:

- 1.- “Pre coring drive”.- El sistema de perforación es bajado añadiendo segmentos de barras internas y externas. Durante este proceso el pistón permanece asegurado.

2.-“Coring Drive”.- Este proceso inicia empujando las barras externas hacia abajo mientras que las barras internas y el pistón permanecen fijos respecto al sedimento (Mingram et al., 2006).

3.-“Pulling free”.- Se extrae el barril de perforación de la capa de sedimentos perforada.



**Figura 5.2.** Partes principales del sistema de perforación utilizado para obtener los núcleos del lago Aljojuca, imagen modificada de Mingram et al., 2010

## **5.2 Preparación del núcleo.**

En laboratorio se abrieron los núcleos cortando en dos el tubo metálico que los contenía. Cortando las mitades de los segmentos con una longitud máxima de 100 cm. Se tomaron fotografías de alta resolución cada 15 a 20 cm y se realizaron mediciones de susceptibilidad magnética de alta resolución.

### **5.2.1 Descripción de los núcleos**

Los núcleos fueron descritos visualmente anotando tamaño de grano, color de los sedimentos, estructuras sedimentarias y materia orgánica. Después se tomaron muestras para describir el contenido mineralógico de manera general utilizando microscopios binoculares. Con estas características, las diferentes unidades litológicas del núcleo fueron agrupadas en seis facies principales, que se compraron con el registro de susceptibilidad magnética alta resolución para tratar de establecer una relación entre ambas.

### **5.2.2 Toma de muestras.**

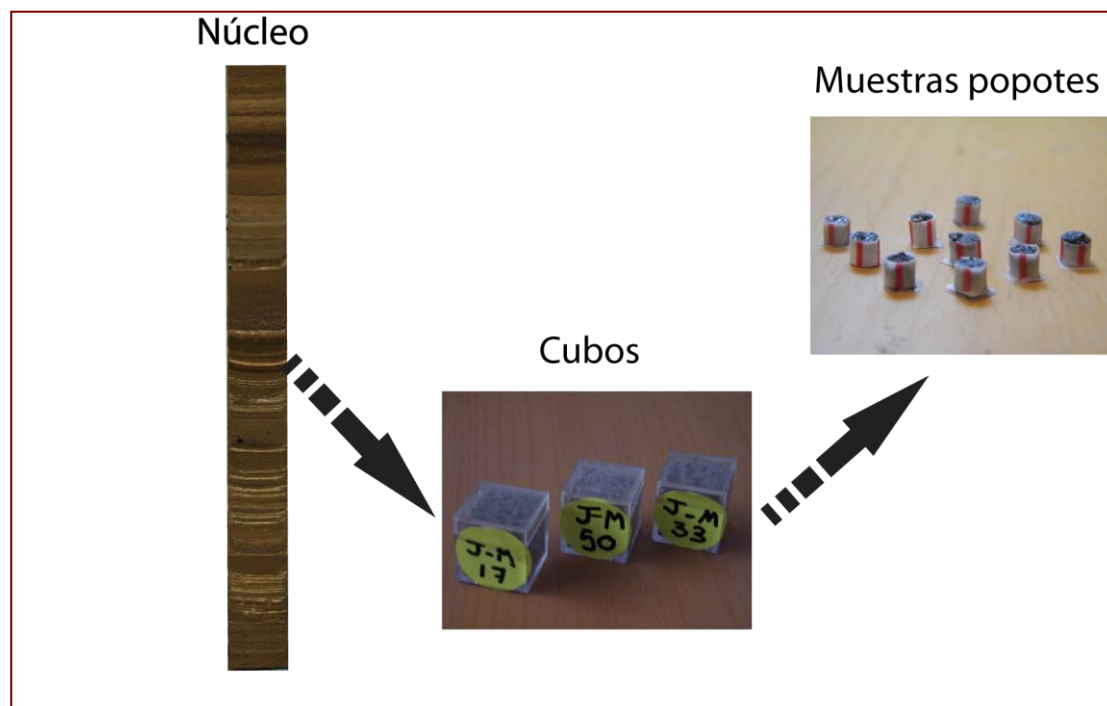
Para los análisis de laboratorio de propiedades magnéticas y direcciones de campo magnético, se tomaron muestras de los núcleos de diferentes maneras; a continuación se describen (Figura 5.3)

### **5.2.3 Cubos**

Se realizó un muestreo de los núcleos con cubos de plástico no magnéticos de una arista de 23 mm y un volumen total de 8 cm<sup>3</sup> (Figura 5.3). Las muestras fueron tomadas en intervalos regulares de cada 1.5 cm, recolectando un total de 1200 muestras. Estas muestras fueron tapadas y selladas en la parte inferior colocando un cinta adhesiva, para evitar la pérdida de humedad y la oxidación de los minerales magnéticos. Posteriormente almacenadas en un cuarto frío a 5 °C. Estos cubos fueron utilizados para las mediciones de NRM y ARM, en el magnetómetro criogénico “2G Enterprise” en el laboratorio de paleomagnetismo de la universidad UC Davis.

### 5.2.4 Popotes

De los cubos se realizó un submuestreo, para mediciones de la histéresis magnética e adquisición de la IRM. Los porta muestras se construyeron con popotes de plástico diámetro de 3 mm y una longitud similar, en la base se les colocó un cuadro de acetato de 3 mm x 3 mm. El sedimento para estas submuestras fue de una masa de 30 mg (muestra seca) aproximadamente ya que el magnetómetro VSM (“Vibrating Sample Magnetometer”), se describe abajo con más detalle) tiene como capacidad máxima de 50 mg. Antes de realizar las mediciones en el sedimento se dejó secar por un día. Todas las muestras fueron protegidas por una capa plástica para evitar posibles contaminantes. Una vez seco el sedimento se aplicó una gota de pegamento instantáneo de cianoacrilato, para contenerla en el portamuestras.



**Figura 5.3.-** Figura que describe la toma de muestras en cubos plásticos, utilizados para mediciones de susceptibilidad magnética y propiedades como NRM, ARM e IRM y muestras en popotes utilizados para mediciones de ciclos de histéresis.

### 5.3 Metodología de laboratorio.

El trabajo de laboratorio consistió en determinar diferentes propiedades magnéticas de los sedimentos como: de magnetización remanente, curvas de histéresis, mediciones de susceptibilidad en campos de baja y alta frecuencia y experimentos de variación de la magnetización inducida en función de la temperatura. A continuación se describe cada uno de estos con mayor detalle.

#### 5.3.1 Susceptibilidad Magnética.

Para conocer la concentración de minerales magnéticos a lo largo del núcleo, se realizaron mediciones de la susceptibilidad de las muestras de cubo y sobre la superficie de los semi-núcleos.



**Figura 5.4.** Sensores Bartington Ms2b utilizado para mediciones de susceptibilidad de baja resolución y sensor MS2E utilizado para mediciones de susceptibilidad de alta resolución.

#### 5.3.2 Susceptibilidad de baja resolución

Para las mediciones de susceptibilidad de muestras de cubo se usó el sensor MS2B (Figura 5.4). Este sensor puede ser usado para mediciones de susceptibilidad normalizada por masa o volumen, también permite realizar mediciones en frecuencias del campo magnético de 0.456 kHz y 4.65 kHz. El

cambio de frecuencias es útil para la identificación de partículas superparamagnéticas. Su resolución es  $2 \times 10^{-6}$  SI ( $2 \times 10^{-7}$  CGS). Este sensor está diseñado para medir cubos de muestras de 25.4 a 23 mm. La unidad contiene una muestra de calibración que es usada antes de iniciar las mediciones, así como el botón denominado “cero” que remueve el desplazamiento (“offset”) debido a materiales magnéticos alrededor del sensor. Los resultados pueden ser expresados en el sistema SI y CGS.

### **5.3.3 Susceptibilidad de alta resolución.**

La susceptibilidad magnética de alta resolución fue medida con un instrumento marca Bartington equipado con un sensor MS2E1. Este sensor está diseñado para medir susceptibilidad magnética de objetos cuya superficie es plana con rugosidades menores a 1 mm. Su área de respuesta es de 3.8 mm por 10.5 mm, la respuesta en función de la distancia disminuye de 50 % a 1 mm a 10 % a los 3.5 mm. Trabaja con una frecuencia de 2 kHz, Para el caso de los semi-núcleos del lago Aljojuca las mediciones se realizaron cada 2 mm.

### **5.3.4 Mediciones de NRM y ARM.**

Las mediciones de magnetización remanente natural (NRM) y magnetización remanente anhistórica (ARM), se realizaron con el magnetómetro superconductor criogénico “2G Enterprise” (Figura 5.5) en la Universidad de UC Davis, California. Este tipo de magnetómetro es considerado como el más sensible para la detección de magnetizaciones de baja intensidad hasta  $5 \times 10^{-9}$  Am<sup>2</sup>kg (Collinson, 1983) lo que lo hace ideal para el trabajo con sedimentos lacustres. Otra ventaja de este magnetómetro, es la posibilidad de medir secciones enteras de los núcleos llamados “U-Channel”. Otra forma en la que se puede usar este equipo es con los cubos plásticos descritos, de esta manera se pueden medir siete muestras simultáneamente. En ambos casos se reducen drásticamente los tiempos de trabajo en el laboratorio comparado con el uso de magnetómetros del tipo giratorio.

### **5.3.5 Principio de funcionamiento de magnetómetro criogénico.**

Este magnetómetro trabaja con sensores SQUID (superconducting quantum interference device) y su principio básico es la cuantificación de flujo magnético. El sistema SQUID, está formado por dos superconductores separados por una delgada capa aislante, formando dos juntas Josephson. Si se mantiene una corriente constante en el SQUID, el voltaje registrado en ambas juntas, depende directamente del cambio en el flujo magnético y estas oscilaciones pueden ser medidas para evaluar los cambios en el flujo magnético que se produce en una muestra.

### **5.3.6 Magnetización remanente natural (NRM)**

La magnetización remanente natural es la magnetización presente en los sedimentos, compuesta por una magnetización primaria que es la adquirida al momento de la depositación de los sedimentos y una o más componentes secundarias adquiridas por eventos geológicos posteriores (Butler, 1998).

Los análisis de NRM que se realizaron aplicando una serie de campos alternos, la secuencia de intensidades utilizadas fue de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 100 mT, aplicada de manera ascendente, para las 1200 muestras, logrando aislar satisfactoriamente la componente primaria de la magnetización remanente, ésta a su vez fue graficada en función de la profundidad.

Debido a que los núcleos no fueron orientados, se obtuvieron los valores promedio de declinación llevando todas las direcciones aun cero promedio, esto se aplicó para los tres núcleos y así poder comparar los resultados.

### 5.3.7 Magnetización Remanente Anhistórica (ARM)

La magnetización remanente anhistórica se impartió en las muestras contenidas en los cubos, a las cuales se aplicó un campo magnético constante de 39.79 A/m y después desmagnetizado con una secuencia de pasos de 100 ,60 ,40 ,35 ,30 ,25 ,20 ,15 ,10 ,5 ,0 mT.



**Figura 5.5.** Magnetómetro criogénico, donde se realizaron mediciones de NRM y ARM.

### 5.3.8 Magnetización Remanente Isotérmica (IRM)

Para la medición de la magnetización remanente isotérmica se utilizaron las muestras contenidas en los cubos, aplicando un campo de saturación de 2.5 T y un campo inverso de 0.3 T ,en las 1200 muestras. Con los resultados se obtuvo la IRMS (magnetización remanente isotérmica de saturación, por sus siglas en ingles) y la razón S que permite estudiar la contribución de materiales ferromagnéticos y antiferromagnéticos. También para la medición de esta propiedad se utilizó el Micromag o magnetómetro de vibración, aplicando un campo de saturación de 1.8 T, con incrementos de campos en secuencia logarítmica. Los resultados del IRM fueron normalizadas por la masa.





**Figura 5.6.** Magnetómetro de pulso utilizado para mediciones de IRM, el campo máximo que alcanza es de 3 T.

### 5.3.9 Histéresis

Se realizaron mediciones de curvas de histéresis magnética utilizando el magnetómetro de vibración Micromag. El funcionamiento básico de este aparato consiste en hacer vibrar una muestra en una región homogénea de un electroimán. El momento magnético genera una señal proporcional que se induce a bobinas adyacentes. Este aparato es producido por la compañía “Princeton Measurement Corporation” su sensibilidad es de  $5 \times 10^{-9} \text{ Am}^2$ . El campo máximo de inducción que alcanza es de 2.2 T El rango de temperaturas en el que puede trabajar es de 4.2 a 1000 K.

Para la obtención de curvas de histéresis se aplicó un campo máximo total de 2 T y después un campo inverso de -2 T. A estas curvas se les realizó la sustracción de la contribución paramagnética obteniendo los siguientes parámetros magnetización de saturación ( $M_s$ ), magnetización remanente ( $M_r$ ), fuerza coercitiva ( $H_c$ ) y fuerza coercitiva remanente ( $H_{cr}$ ), los parámetros  $M_s$  y  $M_r$  fueron normalizados por la masa de la muestra.

### 5.3.10 Curvas Termo-magnéticas.

La temperatura de Curie, ayuda a definir la mineralogía magnética. Para su determinación se mide la variación de la magnetización inducida en un campo magnético intenso en función de la temperatura. Para este tipo de experimentos la balanza de Curie ha sido usada desde las primeras mediciones de magnetización, realizadas por Michael Faraday (1791-1867), Louis-Georges Gouy (1854-1926) y Pierre Curie (1859-1906)(Collison,1983). Este instrumento cuenta con un electroimán que genera un campo magnético y un horno que puede calentar la muestra hasta 700°C. Un sistema de posición del brazo para conocer el desplazamiento de la muestra mientras es calentada, una bobina compensadora entre el electroimán-muestra y el sistema de control de malla cerrada. La medición de la magnetización se obtiene detectando la corriente a la bobina compensadora.

Las mediciones de la temperatura de Curie, se realizaron en dos muestras de cada intervalo en los que fue dividido en núcleo Aljojuca. Estas muestras fueron pesadas, después se les aplicó un campo de 660 mT y se calentaron hasta alcanzar una temperatura de 630 ° C.

### 5.3.11 Fechamientos.

Los fechamientos para los núcleos fueron realizados por el método de C 14 debido a que los sedimentos son muy jóvenes, la edad no supera los 10 000 años. Otro punto que favoreció la utilización de este método para la datación de los núcleos fue la alta cantidad de materia orgánica encontrada en diferentes intervalos, como madera y restos de organismos. Los intervalos seleccionados para los fechamientos, fueron con base en el comportamiento de las mediciones de susceptibilidad donde se observaron cambios importantes en concentración de estos minerales. Se propuso que los cambios fueron provocados tal vez por cambios ambientales o impacto humano. La edad media de calibración usada fue la reportada por Stuiver y Polach (1977) de 5568 años, la concentración de radio carbono moderno es la dada por  $D^{14}C$  los datos fueron calibrados por el software intcal98.14

(Stuiver *et al.*, 2005). Con los datos calibrados se realizó un modelo de edades. Se utilizó la interpolación lineal para obtener las diferentes tasas de sedimentación

## **5.4 Análisis de resultados.**

El análisis de resultados tuvo como objetivos específicos:

- 1.-Determinación de componentes principales de las direcciones de la magnetización remanente característica, utilizando el software ZPLOTIT.
- 2.-Para la determinación de la granulometría magnética, se elaboraron representaciones de diferentes parámetros magnéticas en contra de la profundidad.
- 3.- Análisis de curvas de IRM y curvas termomagnéticas.

### **5.4.1 Determinación de la dirección de magnetización remanente característica.**

La meta principal en los estudios paleomagnéticos es aislar la componente primaria, para determinar la magnetización característica. Para este fin las muestras fueron desmagnetizadas en campos magnéticos alternos y posteriormente se analizaron los resultados con el software ZPLOTIT desarrollado en la Universidad de UC Davis.

ZPLOTIT es un software que produce diagramas de Zijderveld o de componentes vectoriales de magnetización, diagramas de decaimiento de la intensidad de magnetización, diagramas de stereonet. También realiza el análisis de componentes primarias. Este software fue diseñado para trabajar en una plataforma UNIX. Una de las grandes ventajas que ofrece es la rápida y práctica determinación de las componentes primarias de una gran cantidad de muestras. Los gráficos son generados en archivos PDF y el análisis de componentes se genera en hojas de cálculo lo que facilita la manipulación de los datos. Para el análisis de componentes primarias este software utiliza el método de Kirschvink (1980), utilizando un ajuste lineal de mínimos

cuadrados para los últimos cuatro pasos de desmagnetización. Los resultados de los experimentos de desmagnetización fueron graficados en diagramas de Ziiderlveld, que representan el vector de magnetización proyectado en dos planos ortogonales. De estos diagramas se puede obtener la dirección de inclinación y declinación de las componentes primarias.

Los resultados de la intensidad de magnetización fueron graficados, en graficas 2D para observar como decae la magnetización con el incremento de intensidad de los campos magnéticos alternos.

### 5.4.2 Razones de parámetros magnéticos

Para la determinación de la mineralogía magnética, se utilizaron diferentes parámetros obtenidos de los experimentos descritos anteriormente y para esta finalidad también fueron calculados razones de los parámetros, que son sensibles a la composición mineralógica, tamaño de partículas o concentración de partículas como se resume en la siguiente tabla:

Parámetro	Símbolo	Unidades	Interpretación
Temperatura de Curie	T <sub>c</sub>	°C	Es la temperatura a la cual ciertos minerales dejan de tener un comportamiento paramagnético. Con esta propiedad se pueden caracterizar diferentes composiciones químicas de los cristales ya que cada uno tiene una temperatura de Curie característica.
Magnetización isotérmica de saturación.	SIRM	A/m Am <sup>2</sup> /kg(normalizada por el peso)	Esta magnetización es adquirida en presencia de campos magnéticos altos (mayores de 1T), y depende de la concentración de partículas magnéticas.  Es el campo inverso requerido para anular la SIRM

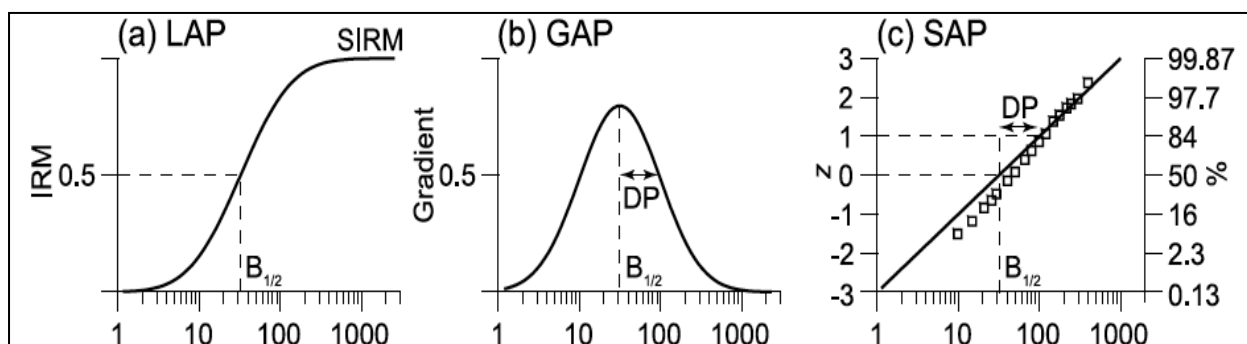
Coercitividad de remanencia	$H_{cr}$	mT	
Susceptibilidad magnética	X(específica)	-----	Es la razón entre la magnetización y un campo externo aplicado, depende directamente de la concentración de partículas magnéticas.
	K (volumétrica)		
Histéresis	$H_c$	mT	Es el campo inverso requeridos para anular la magnetización de saturación. Este parámetro es sensible a tamaño de partícula y composición de partículas magnéticas
		$Am^2/kg$ (normalizada por el peso)	
	$M_s$	A/m $Am^2/kg$ (normalizada por el peso)	
	$M_r$	A/m $Am^2/kg$ (normalizada por el peso)	Magnetización que permanece al remover el campo magnético aplicado. Sensible a la presencia de partículas ferromagnéticas.

**Tabla 5.1.** Tabla que muestra las distintas propiedades magnéticas que fueron utilizados para determinar la granulometría magnética de las muestras. También muestra el símbolo, unidades e interpretación de estas propiedades.

### 5.4.3 Análisis de curvas de IRM.

Es evidente que todas las muestras naturales, ya sean de sedimentos o rocas, contienen un mezcla de distintos tipos y tamaños de minerales

magnéticos, es importante diferenciar la contribución de cada una de esas poblaciones a la magnetización total de la muestra. Para establecer las diferentes contribuciones que hace cada mineral en las curvas de IRM, diversos métodos cuantitativos y cualitativos han sido desarrollados, aunque a veces es difícil realizar una separación de componentes, según cuando existe un 99.00% de hematita contra un 1 % de magnetita, la contribución de magnetita apenas es visible (Kruvier et al., 2001).



**Figura 5.7.** Análisis de componentes de las curvas de IRM, (A) gráfica de adquisición lineal de IRM (LAP) (B) gráfica de gradiente de adquisición de IRM (GAP) (C) gráfica de adquisición estandarizada (SAP). Imagen tomada de Kruvier et al 2001.

El método utilizado para la separación de componentes de las curvas de IRM fue el de Kruvier et al (2001), que esta basado en el método de Robertson y France (1994). Este propone que la derivación de las curvas de adquisición de IRM pueda modelarse una distribución log-Gaussiana, debido a que el tamaño de los minerales en rocas y sedimentos tienen una distribución logarítmica. Este método también propone que una partícula magnética puede ser caracterizada por los siguientes parámetros:

- 1.-Curva de adquisición de IRM en escala lineal
- 2.-El campo al cual se alcanza la mitad de la saturación magnética de la muestra  $B_{(1/2)}$
- 3.-Parámetro de dispersión, dado por una desviación estándar de una distribución logarítmica.

Las modificaciones que Krivier et al (2001) realizan al método, están basadas que la curva de adquisición de IRM sigue una distribución Gaussiana-logarítmica modificando los siguientes parámetros:

1) Los valores de campo se grafican con una escala logarítmica

La escala lineal ordinaria es convertida a una escala logarítmica (Figura 5.7)

Después de estas transformaciones una distribución unimodal es representada por una línea recta. Analizando la curva de adquisición de IRM se puede determinar si corresponde a un modelo de distribución lineal y de esta manera observar el aporte de distintos minerales. También la escala acumulativa de porcentaje fue remplazada por la escala "Z-SCORES" debido a que es más fácil de graficar. El análisis de la curva de adquisición de IRM con una escala lineal es llamado LAP (por sus siglas en inglés) o "gráfica de adquisición lineal", la curva de gradiente GAP (por sus siglas en inglés) y la que es representada en escala logarítmica SAP (por sus siglas en inglés) "gráfica de adquisición estandarizada". El análisis del grado de bondad del ajuste de las diferentes curvas de adquisición de IRM con modelos establecidos, se realiza mediante el cálculo de residuales, que es la diferencia de los valores reales menos los esperados, tratando que esta diferencia sea próxima a cero.

Para este análisis se utilizaron curvas de IRM de los diferentes intervalos en los que se dividió el núcleo, tomando muestras en zonas donde la razón S indicara unos cambios significativos. Después las mediciones de IRM fueron analizadas en la hoja de cálculo de Krivier et al., (2001). La hoja de cálculo muestra los gráficos para el análisis de LAP, GAP y SAP, y se realiza un análisis visual de los gráficos, para definir el número de componentes de la curva de adquisición. Partiendo de los resultados arrojados por el programa se colocan valores de SIRM, B(1/2) y DP para una o varias componentes, dependiendo las formas de las curvas, y se obtienen diferentes ajustes de esos valores hasta que las residuales tiendan a cero.

Este ajuste se puede realizar "n" número de veces hasta que este sea satisfactorio. La hoja de cálculo proporciona automáticamente el porcentaje

de contribución de los diferentes componentes magnéticos. Los valores de SIRM que proporciona esta hoja son relativos.

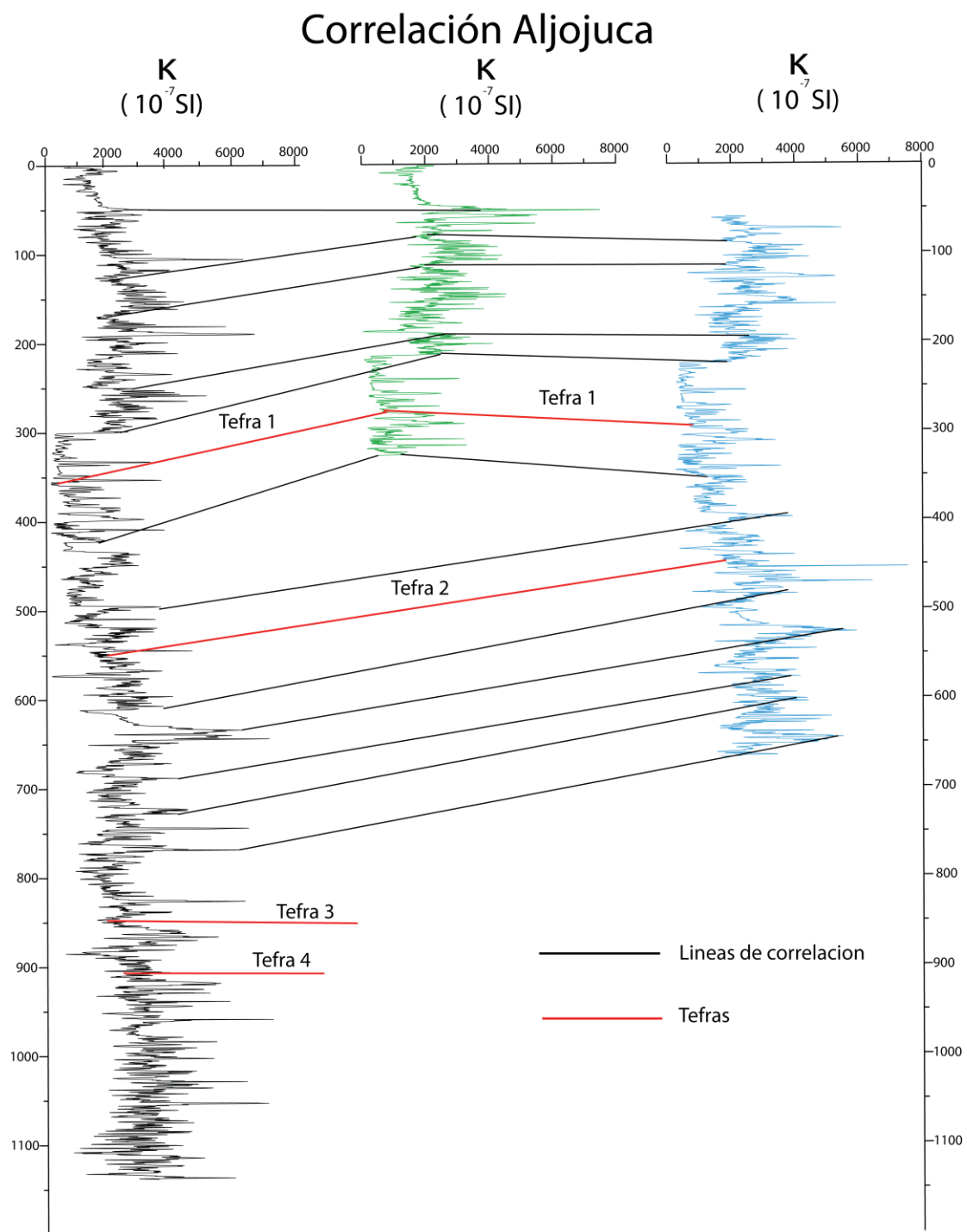


## **Capítulo 6**

### **Resultados**

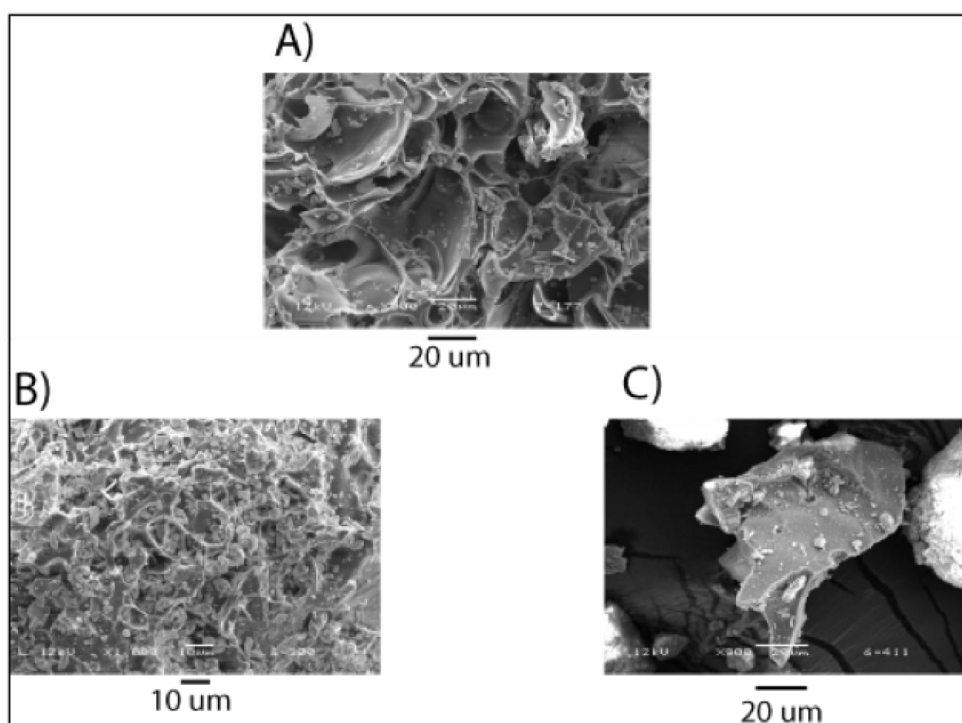
#### **6.1 Correlación de los núcleos**

Para la correlación de los tres núcleos extraídos, se utilizaron los registros de susceptibilidad magnética de alta resolución de cada uno de ellos, dando buenos resultados ya que las señales que se obtuvieron presentan formas similares (Ver Figura 6.1). Otros marcadores geológicos usados para la correlación son cuatro capas de tefra que son identificables, como se muestra en el cuadro de la Figura 6.2. Estas unidades fueron identificadas por bajos de intensidad en la susceptibilidad magnética e imágenes de SEM y fotografías de alta resolución que se obtuvieron de los tres núcleos



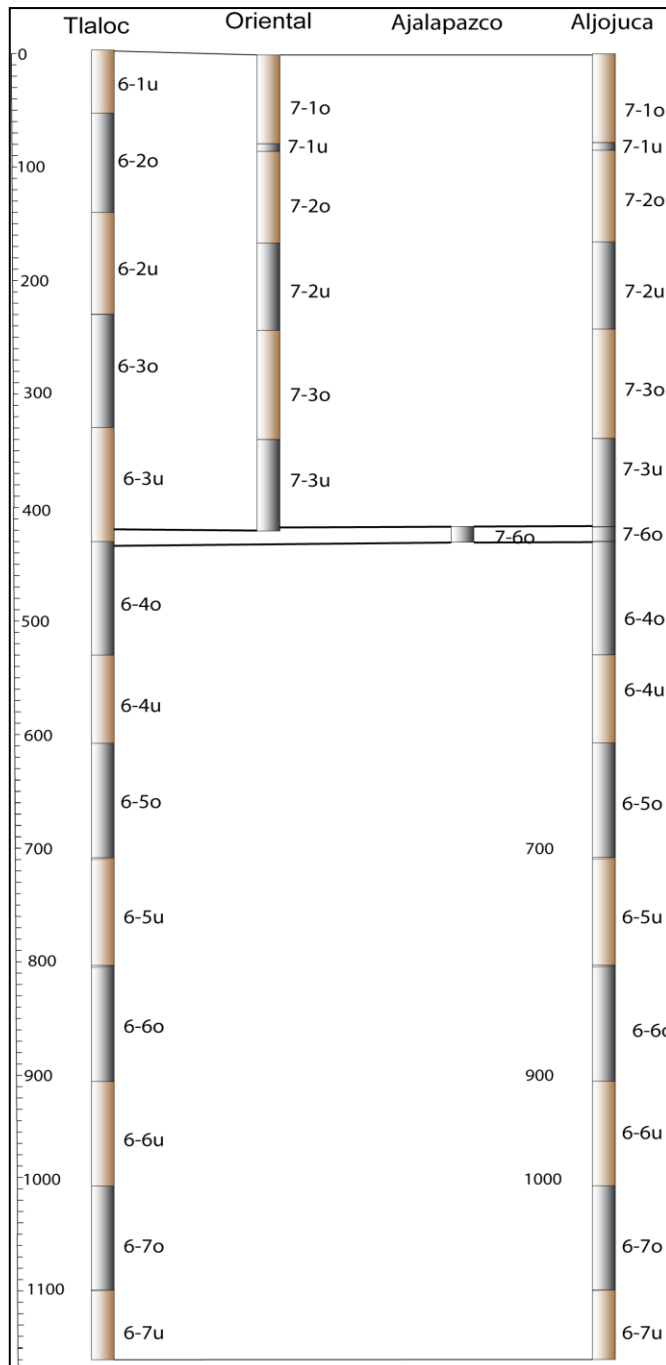
**Figura 6.1.** Correlación de los núcleos Tiáloc (color negro), Oriental (color verde) y Ajalapazco (color azul) a través de el registro de susceptibilidad magnética y marcadores estratigráficos como las tetras volcánicos (representadas por líneas rojas).

Tefra	Tlaloc (cm)	Oriental (cm)	Jalapzco (cm)
1	353	270	280
2	551		450
3	853		
4	909.2		

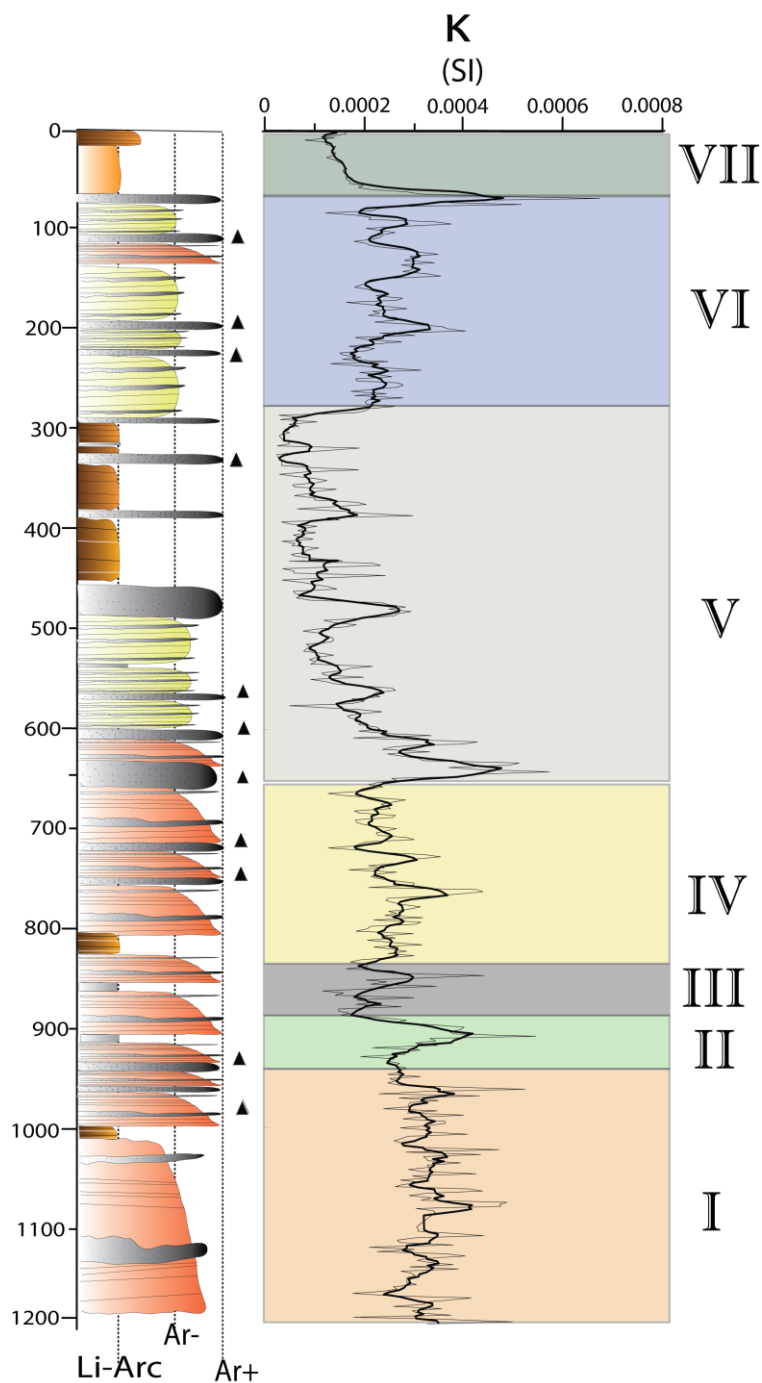


**Figura 6.2.** Tabla de la relación y posición estratigráfica que guardan las tefras entre los tres diferentes núcleo. Imágenes de las tres tefras contenidas en el núcleo Aljojuca, formadas de material juvenil félsico.

Como se observó una buena correlación entre los tres núcleos, se armó un núcleo compuesto usando el proceso de “stacking” que consiste en llevar a una profundidad común a los tres núcleos, después se realizar un promedio de las diferentes propiedades magnéticas obtenidos formando el núcleo compuesto Aljojuca (ver Figura 6.3).



**Figura 6.3.** Diagrama que muestra los segmentos de los tres núcleos que fueron utilizados para formar el núcleo compuesto Aljojuca a partir de los núcleos Tláloc, Oriental y Ajalapazco.



**Figura 6.4.** Señal de susceptibilidad magnética del núcleo compuesto Aljojuca, dividida en las siete zonas principales que se utilizaron para la caracterización de la granulometría magnética

Debido a las propiedades magnéticas como la de parámetros de concentración el núcleo Aljojuca fue dividido en siete zonas como se ve en la Figura 6.4. A continuación se describen las características de cada una de las zonas:

Para la zona I que abarca de los 1171.2-934.9 cm la intensidad de la susceptibilidad magnética muestra una oscilación entre valores bajos de 0.0002 (S.I.) a intensidades altas de 0.0004 (S.I.). Para la zona II que comprende entre los 934.9 -902.6 cm la intensidad disminuye drásticamente a 0.0003 (S.I.) e incrementa su valor hasta alcanzar 0.0004 (S.I.) disminuyendo de nuevo. Para la zona III que corresponde de 902.6- 820.9 cm se presentan oscilaciones de la intensidad entre 0.00015 (S.I.) incrementando hasta 0.0003 (S.I.). La zona IV abarca de los 820.9 – 651.2 cm mostrando intensidades por debajo de 0.0002 (S.I.) y solo un alto de intensidad de 0.0004 (S.I.). Para La zona V que comprende de los 651.2-278.2 cm la característica representativa es que en la base existe una intensidad máxima de 0.0005 (S.I.) disminuyendo hasta 0 (S.I.) en la parte final de la zona. La zona VI que va de 278.2- 92.9 se observan oscilaciones de la intensidad que van de 0.0002 (S.I.) a 0.0005 (S.I.) siendo esta zona la que presenta una mayor intensidad de este parámetro a lo largo de todo el núcleo. La zona VII va de 92.9 – 0 cm la intensidad máxima es de 0.0005 (S.I.) encontrada en la base del intervalo, después esta disminuye de manera constante.

## 6.2 Estratigrafía Núcleo compuesto Aljojuca.

La estratigrafía del núcleo compuesto Aljojuca se describió con base en la mineralogía, estructuras sedimentarias y la curva de susceptibilidad magnética de alta resolución utilizando unidades arbitrarias, lo que resulta en la definición de cinco facies (ver Figura 6.5). En estas facies la fracción de arenas esta formada principalmente de óxidos de hierro, minerales ferromagnesianos y granos de cuarzo en baja proporción. En las facies A,B y E se observan fragmentos de obsidiana.

**Facies A.-** Intercalación de estratos de lodo, con laminaciones tenues de lodos y arenas. Los estratos de lodo tienen un espesor mínimo de 0.5 cm y como máximo de 2.5 cm. Su color es café claro, con contactos concordantes y estructuras de carga. Las laminaciones tenues presentan colores café claro a blanco compuestas por material arcilloso. Las arenas presentan estratificación menor a los 0.5 cm llegando a ser laminaciones, su tamaño va de grano grueso a fino. La proporción de arena-lodo es de 40-60%, respectivamente. La susceptibilidad máxima es de 4000 mientras que la minima es de 7000.

**Facie B.-** Estratos de arenas con gradación normal, con espesores entre 2 y 10 cm , con contacto concordante y erosivos entre las diferentes facies que sub y sobreyacen . Los valores de susceptibilidad varían entre 5500 a 7000.

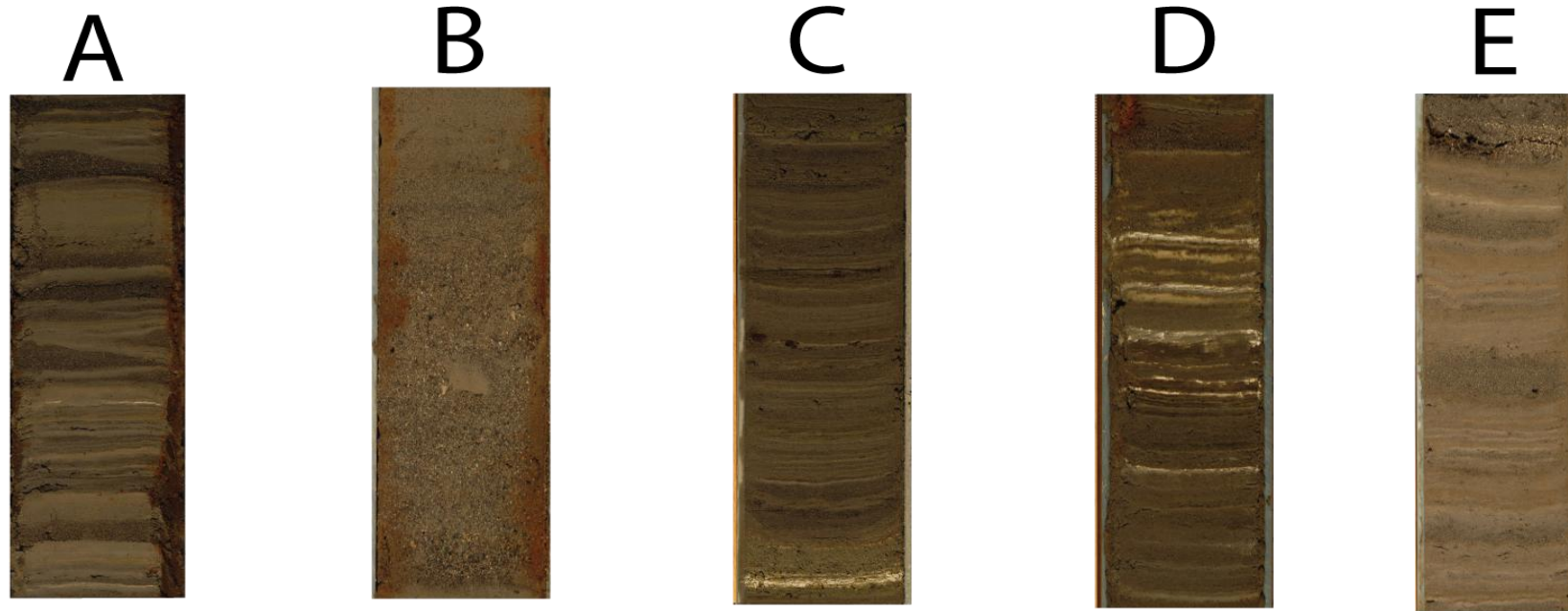
**Facie C.-** Laminaciones marcadas de color blanco y café, con intercalaciones de arenas. Los contactos son concordantes. La proporción de arenas lodos es de 30-70% respectivamente, y los valores de susceptibilidad oscilan entre, 300 a 2000.

**Facie D.-** Intercalación de capas de arenas con laminaciones tenues con y capas concordantes de lodos. Las laminaciones presenta colores blancos, café y están compuestas de material arcilloso, el espesor va de 0.5 cm a 2 cm. Los valores de susceptibilidad van de 1000 a 2500.

**Facie E.-** Intercalaciones rítmicas de laminaciones medianamente marcadas de color café claro con estratos finos de arena, con contactos concordantes. Las laminaciones son de color café claro de material arcilloso. Los valores de susceptibilidad son de 900 a 3000.

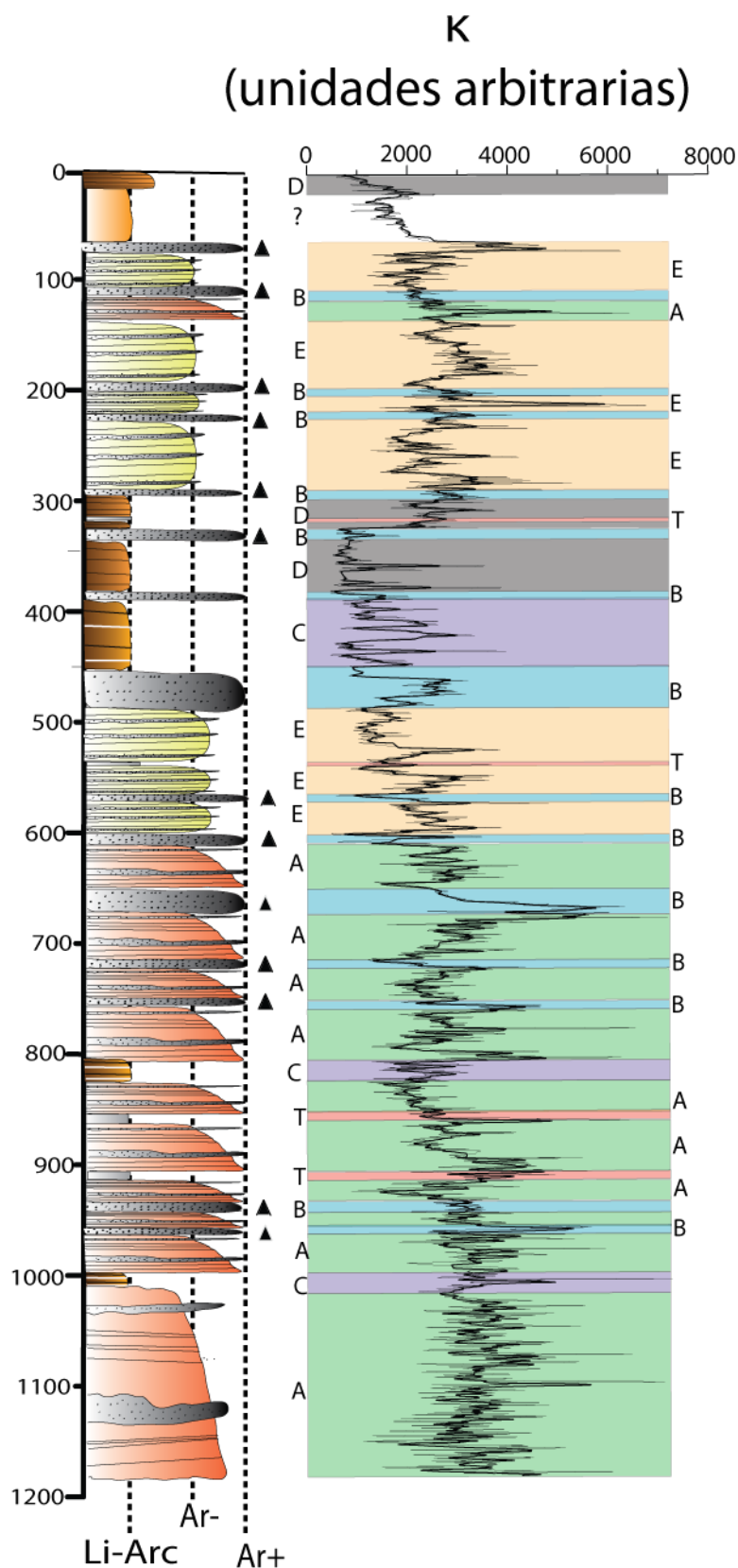


# Facies del lago Aljojuca



Escala ■■■  
5 cm

**Figura 6.5.** Imágenes de alta resolución de las cinco facies definidas para el núcleo compuesto Aljojuca.

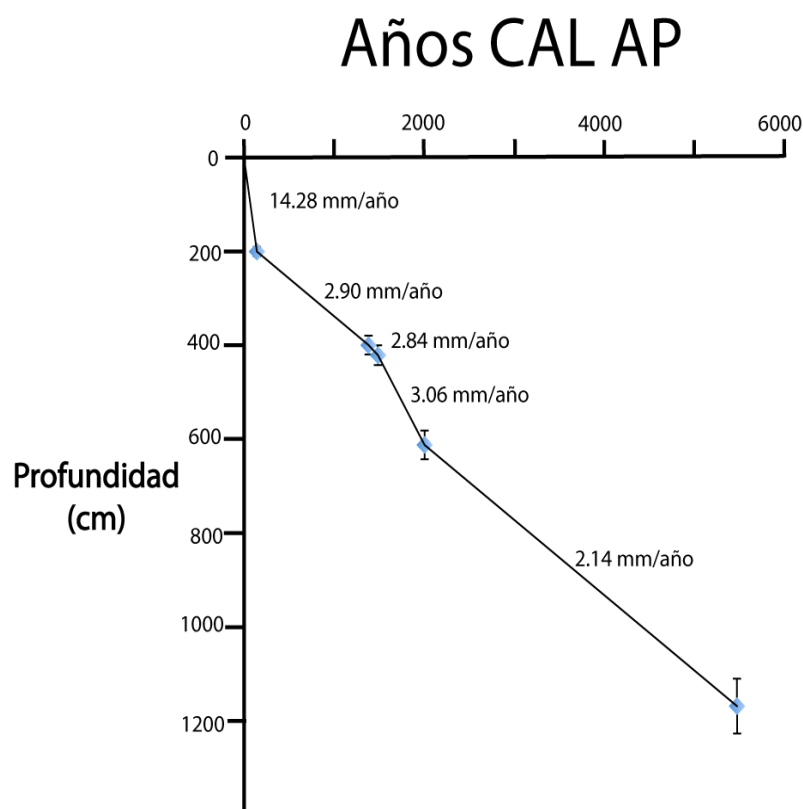


**Figura 6.6.** Columna estratigráfica del núcleo compuesto Aljojuca, los triángulos negros indican gradación normal, las líneas punteadas muestran la proporción de variación de sedimentos limo-arcillosos y la proporción de arenas. Esta columna es comparada con un registro de susceptibilidad magnética, dividido en las principales facies reconocidas, de color verde para las facies A, color azul para facies B, colores morado facies C, color gris facies D, color naranja facies E y color rojo para los horizontes de tetras.

### 6.3 Modelo de edades.

Para el modelo de edades del núcleo Aljojuca se obtuvieron cuatro edades C14 (véase tabla 6.1). La edad máxima que se obtuvo para el núcleo compuesto es de 5460 años A.P. (comunicación personal de Battacharya 2012) a los 1171.2 cm que corresponde a la base del núcleo. Utilizando interpolación lineal de los datos se calcularon 5 tasas de sedimentación mostradas en la Figura 6.7. La primer tasa de sedimentación es anormalmente alta en comparación a las demás tasas, esta es de 14.28 mm/año y abarca hasta una profundidad de 200 cm mientras que las demás van de 2.14 a 3.06 mm/año.

También se utilizó el modelo de edades para calcular las profundidades a las que corresponden fechas con importancia histórica en la zona, como el apogeo de la ciudad de Cantona, cuando esta ciudad alcanza un máximo de 50 mil habitantes, la caída de esta ciudad (950 d.C.), la llegada de los colonizadores españoles y la propagación de la epidemia conocida como Cocoloztli (1545) en épocas coloniales, de la cual no se conoce mucho aun (ver Tabla 6.2).



**Figura 6.7.** Modelo de edades calibradas AP del lago Aljojuca. Se graficaron las diversas edades C14 con sus barras de error. La línea punteada representa la interpolación realizada entre los 0 y 200 cm de profundidad. La línea continua muestra el modelo lineal aplicado a los datos de 200, 400, 421.7 y 613.

Profundidad (cm)	Nombre de muestra	Edad C <sup>14</sup>	δ C <sup>13</sup>	Edad Cal A.P.	68% Rango de edades Cal	Edad Calendarica
200	Aljojuca 7-121	140±35	-25	140±103	37-243	1810±103 d.C
400	Aljojuca-7-217	1495±30	-25	1378±25	1352-1403	572±25d.C
421.7	Aljojuca-7-227	1600±35	-25	1482±47	1434-1529	468±47 d.C.
613	Aljojuca-6-204	2035±30	-25	1997±43	1953-2040	47±43 a.C.

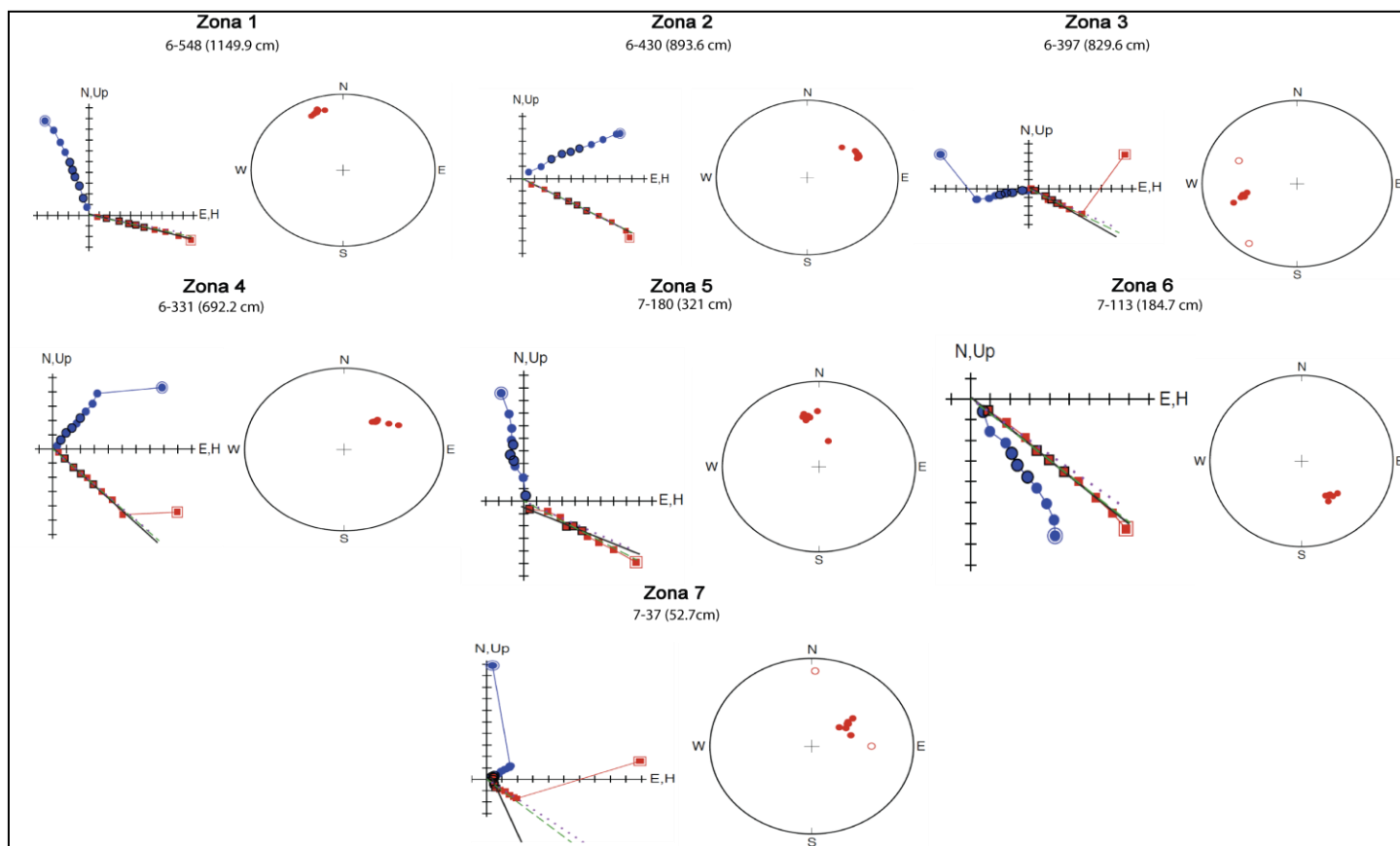
**Tabla 6.1.** Muestra las cuatro edades calculadas y calibradas con intcal98.14c ( Stuiver,1998) del núcleo Aljojuca

Profundidad (cm)	Edad A.P.	Edad calendarica	Hecho histórico
240	410	1540 d.C.	Llegada de españoles. Epidemia Cocoliztli.
338	1000	950 d.C	Caída de Cantona
470	1650	330 d.C	Población de 50 mil habitantes en cantona.
630	2250	300 a.C.	Inicia apogeo de Cantona
1171.2	5460	3510 a.C	

**Tabla 6.2.** Tabla que muestra la cronología de hechos históricos calculados a partir del modelo de edades del núcleo Aljojuca.

## 6.4 Resultados paleomagnetismo.

Los 1200 ejemplares analizados, mostraron intensidades magnetización remanente natural del orden de  $10^{-2}$  A/m. A través de los diagramas Zijderveld se observó que el 80 % de las muestras presenta una componente de magnetización interpretada como la primaria, con un MAD menor de 10 (ver Figura 6.8 y anexos).



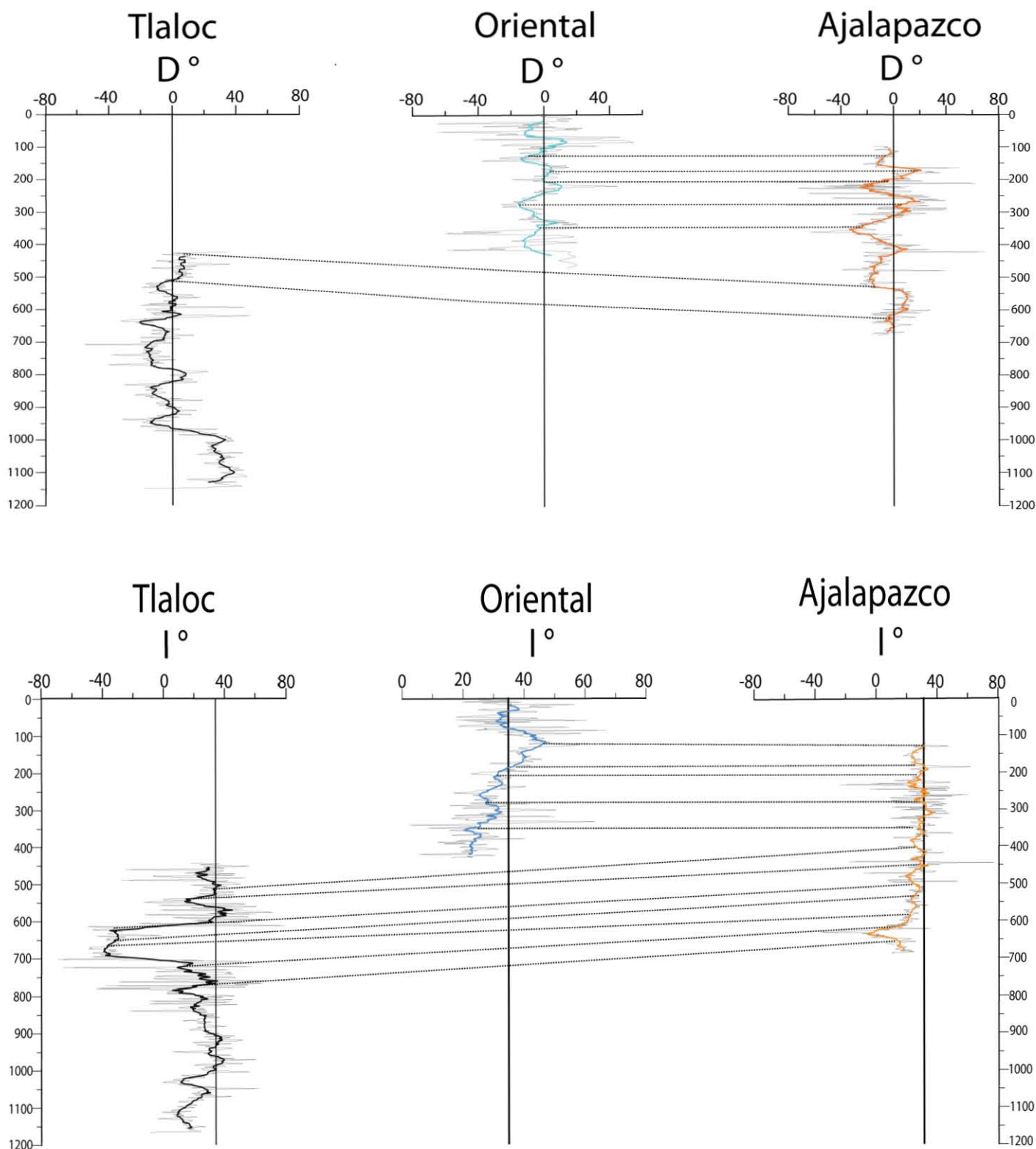
**Figura 6.8.** Ejemplos de diagramas ortogonales de desmagnetización de las diferentes zonas, en las que se dividido el núcleo compuesto Aljojuca. Se muestran diagramas de Zidervedl y redes estereográficas representativos de cada zona. En los diagramas de Zidervedl se muestran con puntos azules la componente horizontal y cuadros rojos la componente vertical. Para las redes estereográficas los puntos cerrados representan la declinación y los abiertos la inclinación.

El registro de declinación del núcleo Tlálóc que comprende de los 1100 cm a 800 muestra cambios abruptos que van de  $0^\circ$  y  $40^\circ$ , de los 800 cm a la cima presenta un registró con valores alrededor de  $0^\circ$ . Para el núcleo Oriental que comprende de los 0 cm a los 400 cm, el registro es inestable con variantes de la declinación a lo largo de todo el núcleo, con valores desde  $20^\circ$  hasta  $-20^\circ$ .

Por último, el núcleo Ajalapazco que comprende de los 100 cm a los 800 cm muestra declinaciones con valores entre  $20^{\circ}$  y  $-40^{\circ}$  (Ver Figura 6.9).

Para la inclinación los resultados de las direcciones tampoco muestran consistencia entre los tres núcleos. Para el núcleo Tlalóc, las inclinaciones van de  $20^{\circ}$  a  $40^{\circ}$  hasta la profundidad de 1000 cm, donde se observa un cambio de dirección importante hasta alcanzar los  $0^{\circ}$ . Para el núcleo Oriental los valores de inclinación oscilan entre los  $20^{\circ}$  a  $60^{\circ}$  a lo largo de toda la sección. En el núcleo Ajalapazco, la inclinación varía entre los  $20^{\circ}$  y  $30^{\circ}$ , pero al alcanzar la profundidad de 700 cm, existe una dirección de  $-20^{\circ}$  que no tiene correlación con ninguno de los otros dos núcleos (ver Figura 6.9).

Al tratar de realizar la correlación de las direcciones paleomagnéticas de los tres núcleos utilizando los mismos intervalos del parámetro de susceptibilidad magnética, se observa que no guardan una buena correlación entre ellos como se muestra en la Figura 6.9.



**Figura 6.9.** Curvas de declinación e inclinación de los núcleos Tláloc, Oriental y Jalapazco. Las líneas punteadas son los intervalos utilizados en la correlación entre los núcleos utilizando el parámetro de susceptibilidad. La línea sólida pertenece al VGP de la localidad.

Zona		Mineralogía Magnética							
		Histéresis			N	IRM		Razón S	N
Hc (mT)	Mr (Am/kg) (10 <sup>-3</sup> )	Ms (Am/kg) (10 <sup>-3</sup> )	Hcr (mT)	Mr (Am/kg) (10 <sup>-3</sup> )					
1	Promedio	15.8	62.5	322.85	26	45.75	77.77	0.939	105
	Desviación Estandar	1.66	16.15	95.06		3.87	61.76	0.039	
2	Promedio	15.53	59.72	317.71	3	55.90	59.42	0.950	14
	Desviación Estandar	19.4	14.75	59.68		4	107.45	0.055	
3	Promedio	15.03	37.08	240.62	9	43.27	37.03	0.961	36
	Desviación Estandar	2.23	16.39	123.69		2.71	16.41	0.032	
4	Promedio	14.96	52.86	312.4	14	46.95	50.13	0.905	78
	Desviación Estandar	1.63	13.85	119.57		2.51	14.57	0.053	
5	Promedio	15.51	37.42	173.80	42	50.10	34.89	0.902	175
	Desviación Estandar	3.23	56.39	104.64		9.50	34.89	0.043	
6	Promedio	15.36	59.16	336.79	20	46.31	71.11	0.903	86
	Desviación Estandar	1.23	17.33	104.18		2.26	72.81	0.040	
7	Promedio	13.30	41.82	249.87	11	42.44	38.38	0.929	43
	Desviación Estandar	0.26	12.78	63.81		2.08	10.53	0.033	

**Tabla 6.3.** Comparación de los promedios para los parámetros magnéticos de la curva de histéresis, curvas de IRM y razón S para el núcleo compuesto Aljojuca. También se muestran las desviaciones estándar de cada uno de los parámetros y el número de muestras utilizadas para la obtención de estos promedios.

### 6.5 Estratigrafía magnética

A continuación se describirán los resultados de propiedades magnéticas útiles para la descripción de la mineralogía magnética para las siete zonas del núcleo compuesto Aljojuca.

**Zona I.-** Para esta zona se observa un valor promedio de la razón S de 0.93 obtenido de 105 muestras (ver Tabla 6.3) mostrando la dominancia de minerales de baja coercividad. El mismo parámetro graficado contra profundidad muestra una intensidad uniforme solo con dos decrementos a los 1152 y 952 cm indicando el aumento en minerales de baja coercividad en estas dos zonas (ver Figura 6.10). Las curvas de histéresis tienen una forma estrecha (ver Figura 6.11). El promedio de coercividades para esta zona es de 15.8 mT y una Mr de 77.77 x10<sup>-3</sup> Am<sup>2</sup>/kg indicando el contenido de minerales ferromagnéticos. Para el análisis de componentes de IRM se utilizaron las muestras 6-531 y 6-509. La muestra 6-531 refleja la contribución del 94% de un componente de baja coercividad y del 6 % de una componente de alta coercividad (Ver anexos). Para la muestra 6-509 una contribución de 79% de una componente de baja coercividad, saturando en campos de 300 mT (ver 6.13), de 5 y 16 % de dos componentes de alta coercividad (ver anexos). La curva termo-magnética analizada para esta zona se obtuvo de la muestra 6-448(932.9cm) su magnetización decae en dos ocasiones primero a



los 420 ° C y después a los 580 ° C indicando la presencia de por lo menos dos minerales magnéticos. Esta curva no es reversible, al aplicar los pasos de enfriamiento en la curva, la magnetización es inferior a la inicial, indicando una alteración en la mineralogía original (ver Figura 6.12).

**Zona II.-** El valor promedio de la razón S es de 0.95 obtenido de un total de 14 muestras (ver Tabla 6.3) reflejando la dominancia de minerales de baja coercividad. En la curva de la razón S contra profundidad, el parámetro se mantiene con una intensidad estable (ver Figura 6.10). Las curvas de histéresis de esta zona muestran una forma estrecha con valores promedio de coercividad de 15.53 mT y una  $M_r$  de  $59.72 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$  reflejando la presencia de minerales ferromagnéticos (ver Figura 6.11). La muestra usada para el análisis de componentes de IRM fue la 6-430 (ver Figura 6.13). Esta muestra tiene una contribución del 97 % de una componente de baja coercividad alcanzando la saturación con en presencia de campo de 344 mT y de 35% de una contribuyente de alta coercividad (ver anexos). Los valores de la curva termo-magnéticas para la muestra 6-410(858 cm) indica que la magnetización decae a los 560 °C. La curva no es reversible, la intensidad decae en los pasos de enfriamiento de la muestra indicando una alteración de los minerales magnéticos (ver Figura 6.12).

**Zona III.-** La razón S tiene una intensidad promedio de 0.961 de un total de 9 muestras indicando la dominancia de minerales de baja coercividad (ver tabla 6.3). Al graficar este parámetro en contra de profundidad (ver Figura 6.10) se observa que la intensidad disminuye, reflejando la disminución de minerales de baja coercividad y aumentando la proporción de minerales de alta coercividad. Las curvas de histéresis presenta un formar estrecha indicando bajas coercividades (ver Figura 6.11), el valor promedio que se obtuvo para esta zona fue de  $H_c$  15.03 y de  $M_r$   $37.08 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ , reflejando la dominancia de minerales ferromagnéticos. El análisis de componentes de la curva de IRM fue efectuado en la muestra 6-402 y revela 3 componentes principales la componente de baja coercividad tiene una contribución de 88% (ver Figura 6.13) y dos componentes de alta coercividad que contribuyen en 4% alcanzando a saturación en campo de 430 mT y 7% (ver anexos) . El análisis de la curva termo-magnética de la muestra 6-402(840 cm) muestra

una temperatura de Curie 580 °C en donde la intensidad de la magnetización decae a cero. La intensidad de magnetización decae en los pasos de enfriamiento de la muestra, indicando un alteración termal de los minerales (ver Figura 6.12).

**Zona IV.-** La razón  $S$  tiene un valor promedio de 0.905 de un total de 78 muestras (ver Tabla 6.3) indicando la dominancia de minerales de baja coercividad. Al graficar este parámetro en contra de la profundidad muestra que la intensidad se mantiene constante hasta la profundidad de 708.9 cm donde disminuye drásticamente, reflejando un cambio en el contenido de minerales de baja coercividad a minerales de alta coercividad (ver Figura 6.10). Las curvas de histéresis para esta zona son estrechas con una  $H_c$  promedio de 14.96 mT y  $M_r$   $52.86 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$  (ver tabla 6.3) sugiriendo la presencia de minerales ferromagnéticos. Para el análisis de curvas de IRM de esta zona se utilizaron las muestras 6-331 y 6-388. La muestra 6-331 presenta 3 componentes una de baja coercividad que saturan en campos de 430 mT (ver Figura 6.13) y su contribución es de 91 % y otras dos de alta coercividad con una contribución de 6% y 3 %. La muestra 6-388 muestra una componente de baja coercividad que tiene un contribución de 95 % y una componente de alta coercividad con una contribución de 5% saturando en presencia de un campo de 430 mT (ver anexos). Los valores de la curva termo-magnéticas de la muestra 6-384 (801.6 cm) en los que decae la magnetización son de 575 °C. Esta curva no es reversible debido a que la intensidad de la magnetización inicial decae en los pasos de enfriamiento, indicando alteraciones en los minerales magnéticos.

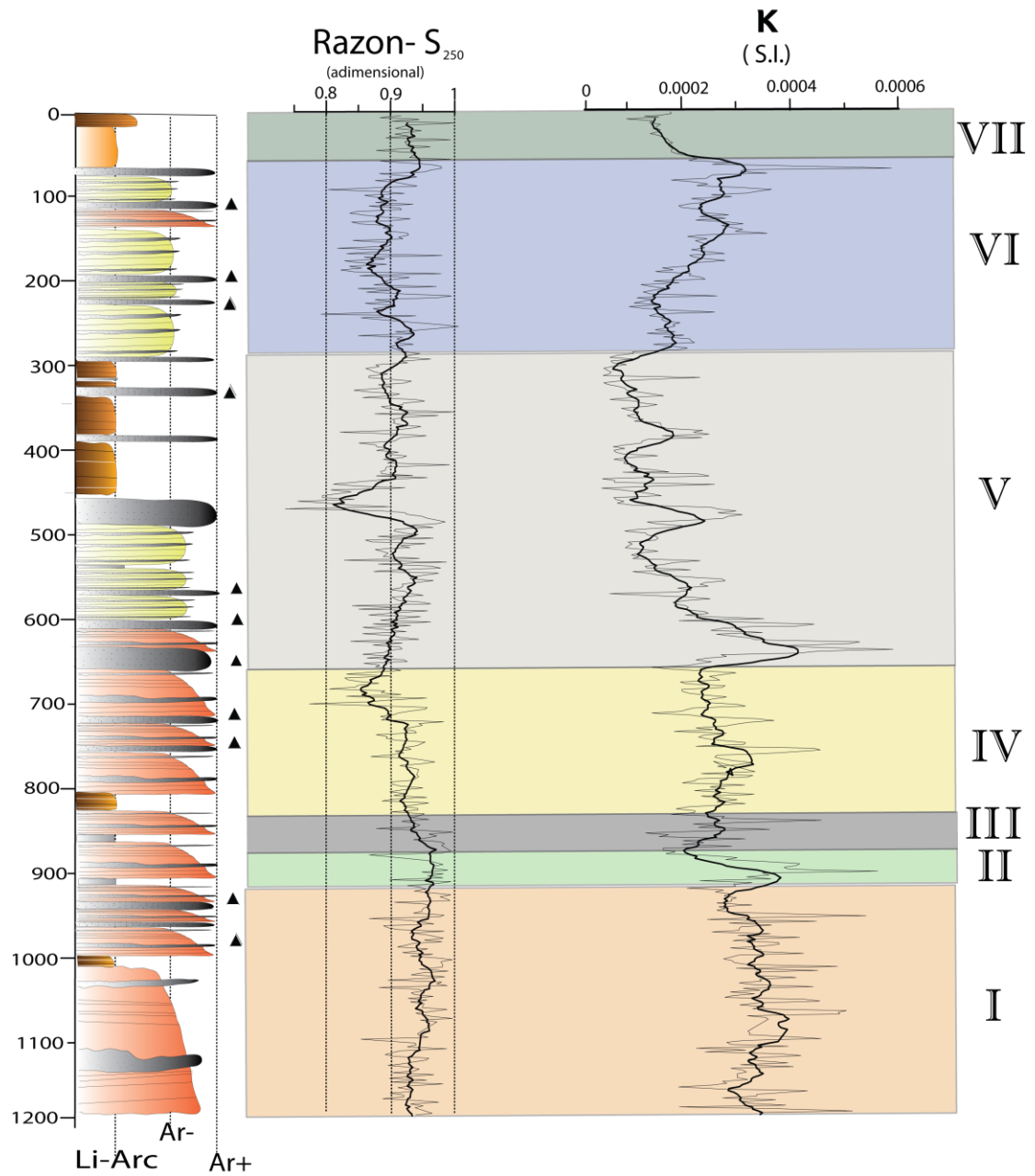
**Zona V.-** Esta zona muestra un valor promedio de la razón  $S$  de 0.902 obtenido de 175 muestras, este valor indica la dominancia de minerales de baja coercividad (ver Tabla 6.3). La curva de esta razón muestra que los valores se mantienen alrededor de 0.9; solo a los 464 cm la intensidad disminuye drásticamente reflejando un cambio a minerales de alta coercividad (ver Figura 6.10). Las curvas de histéresis tienen una forma estrecha (ver Figura 6.11) con un valor promedio de 15.51 mT y una  $M_r$   $52.86 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$  (ver Tabla 6.3) valores típicos para minerales ferromagnéticos. Para el análisis de curvas de IRM se utilizaron las muestras 6-323 y 7-250. La

muestra 6-323 muestra una componente de baja coercividad con una contribución del 90% saturando en presencia de un campo de 300 mT y una componente de alta coercividad con una contribución total de 10 % (ver anexos). Para la muestra 7-250 se observan dos componentes una de alta coercividad que contribuye el 94% saturando en presencia de un campo de 300 mT (ver Figura 6.13) y otra de alta coercividad que contribuye en un 6 %. La curva termo-magnética de la muestra 7-231 (425.4 cm) primero decae la intensidad a los 450 °C incrementándose de nuevo para volver a perder intensidad a los 575°C después la magnetización incrementa en los pasos de enfriamiento de la curva indicando una alteración en los minerales magnéticos.

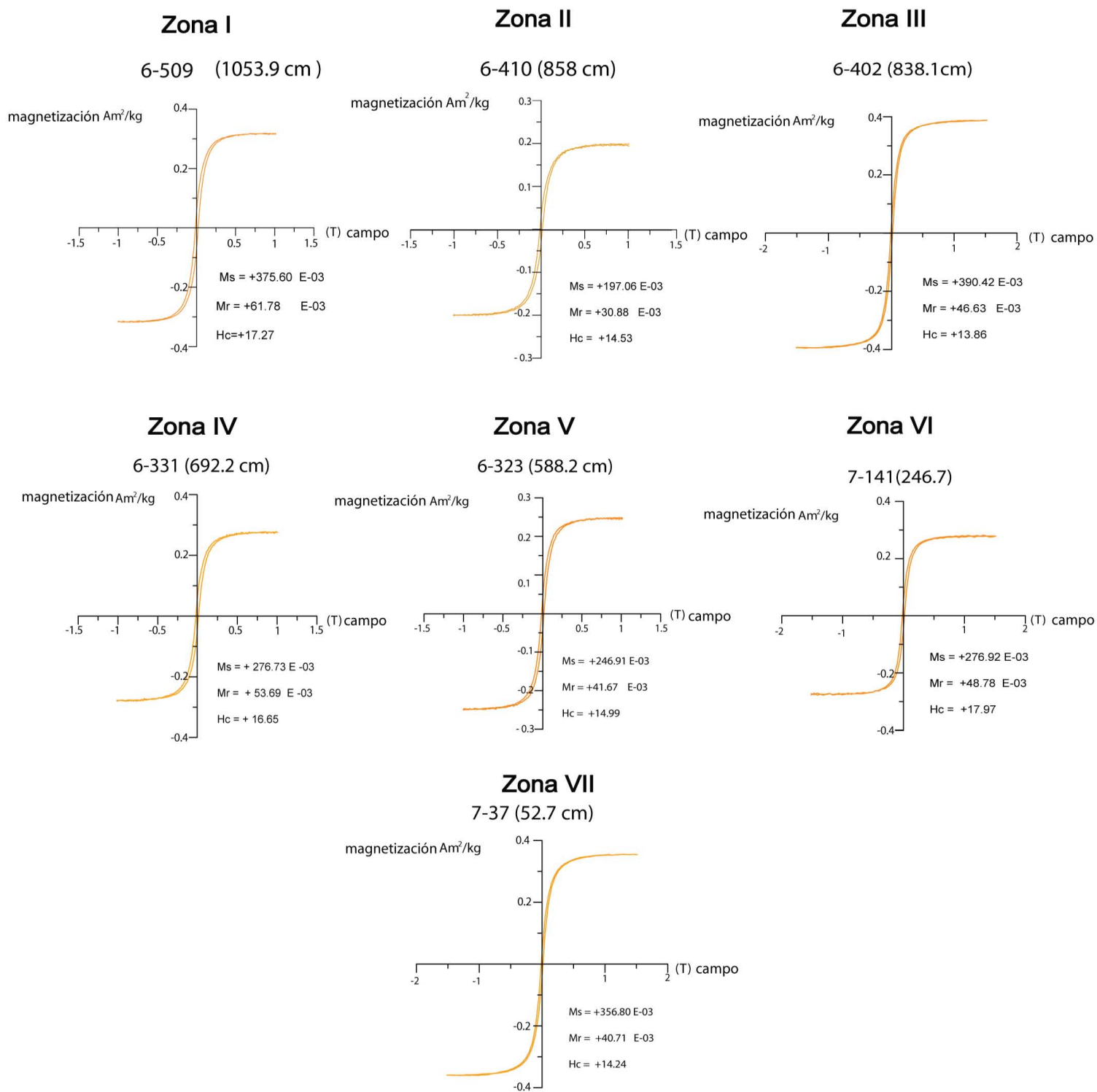
**Zona VI.-** La razón S muestra un valor promedio de 0.903 indicando la dominancia de minerales de baja coercividad (ver Tabla 6.3). Al graficar este parámetro en contra de la profundidad se observa que las intensidades se encuentran alrededor de 0.9; también existe un decremento de intensidad a los 99 cm indicando un incremento de minerales de alta coercividad (ver Figura 6.9). Las curvas de histéresis tienen una forma estrecha mostrando promedio de  $H_c$  15.36 y  $M_r$   $59.16 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$  (ver Tabla 6.3) debido a la presencia de minerales ferromagnéticos. Para el análisis de las curvas de IRM de la zona se utilizó las muestras 7-141 y 7-113. La muestra 7-141 muestra dos componentes una de baja coercividad que contribuye en 93 % y una componente de alta coercividad que contribuye en un 7 % saturando en presencia de un campo de 491 mT . La muestra 7-113 presenta dos componentes una baja coercividad que contribuye en un 98 % y una de alta saturación que contribuye en un 2 % (ver Figura 6.13). En la curva termo-magnética para la muestra 7-64 (86.5 cm) la magnetización decae a los 550 °C. Esta curva no es reversible ya que la intensidad de la curva disminuye en los pasos de enfriamiento, indicando una alteración de los minerales magnéticos (ver Figura 6.11).

**Zona VII.-** La razón S muestra un valor promedio de 0.92 (ver Tabla 6.3) mostrando una dominancia de minerales de baja coercividad. La grafica de este parámetro contra profundidad muestra una intensidad constante indicando que no existe cambios significativos en el tipo de mineral en esta

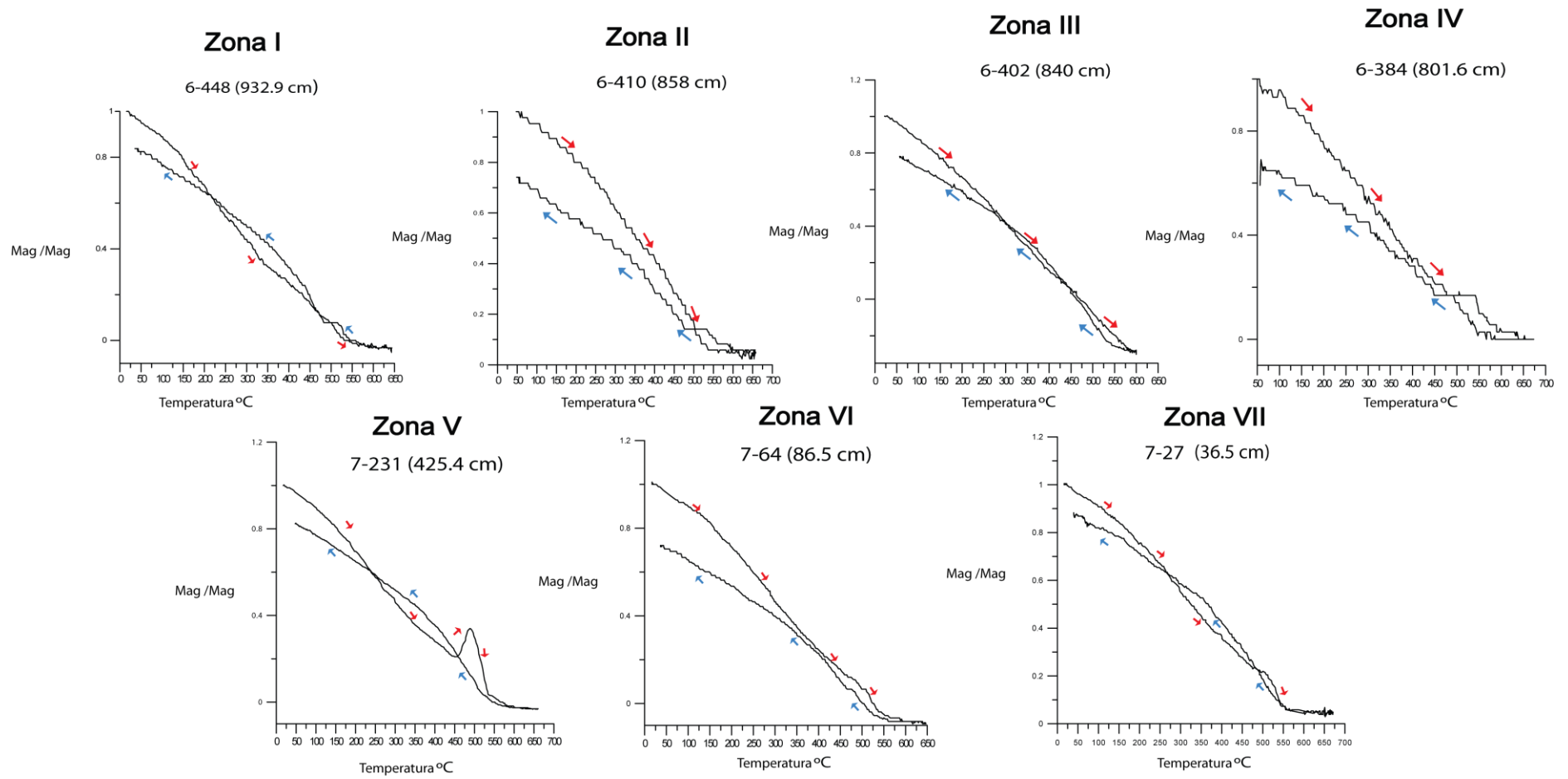
zona ( ver Figura 6.10). La curva de histéresis tiene una forma estrecha (ver Figura 6.11) mostrando un valor promedio de  $H_c$  13.20 mT y  $M_r$   $41.82 \times 10^{-3}$  Am<sup>2</sup>/kg típicos de minerales ferromagnéticos. Se utilizó la muestra 7-37 para el análisis de componentes de la curva de IRM. Esta muestra indican la presencia de dos componentes principales, una de baja coercividad con una contribución de 98% saturando en presencia de un campo de 344 mT (ver Figura 6.13) y otra con una componente de alta coercividad con un contribución de 2% (ver anexos). La curva termo-magnética para la muestra 7-27(36.5 cm) señala que la magnetización decae a la temperatura de 380 y 580 °C mostrando presencia de al menos dos diferentes minerales magnéticos. La intensidad de magnetización de la curva aumentan en los pasos de enfriamiento, indicando tal vez una alteración en los minerales magnéticos (ver Figura 6.12).



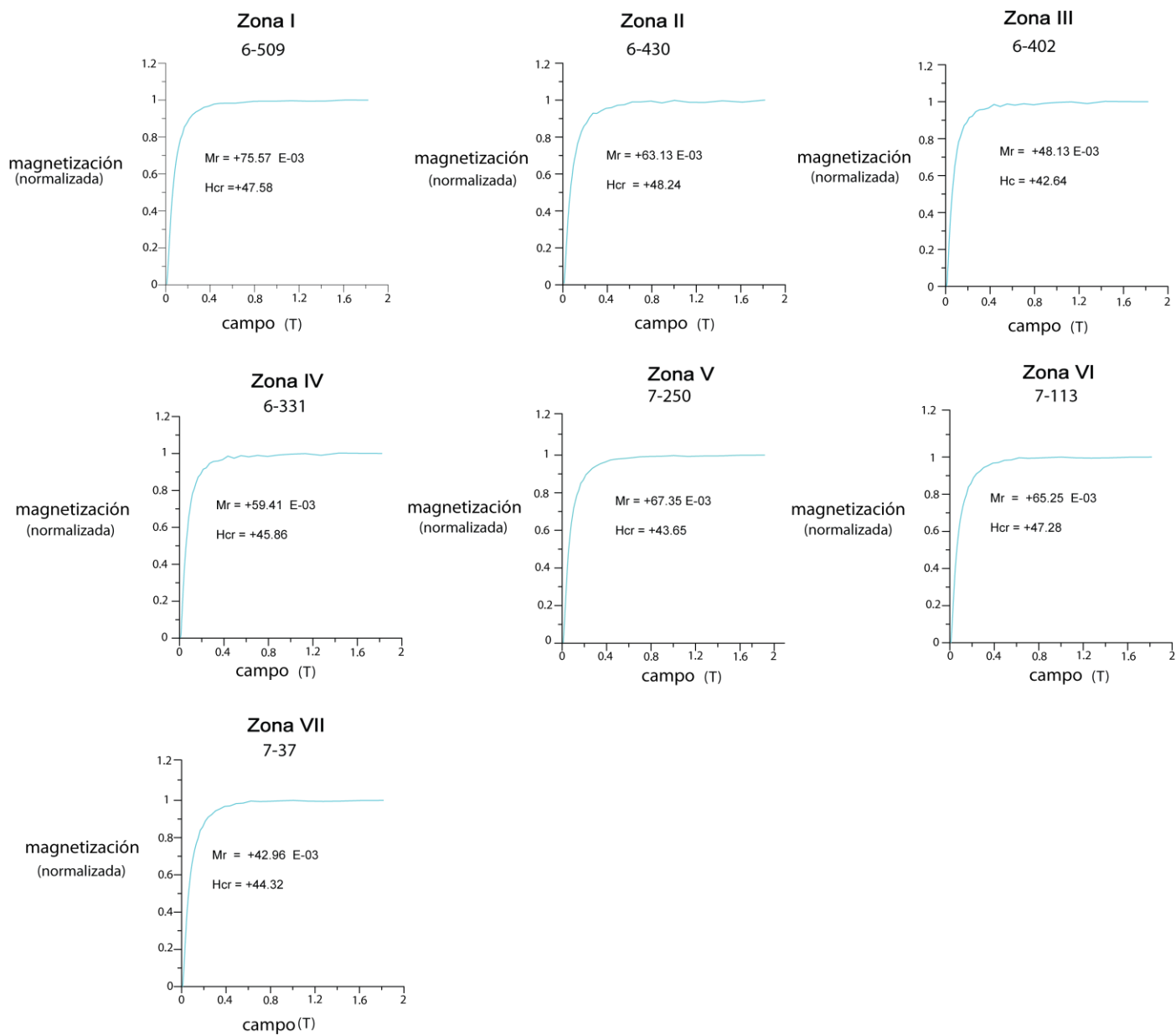
**Figura 6.10.-** Estratigrafía del núcleo Aljojuca dividida en las siete zonas principales y la variación del factor S y la susceptibilidad magnética.



**Figura 6.11.** Curvas de histéresis representativas de cada una de las siete zonas del núcleo compuesto Aljojuca.



**Figura 6.12.** Curvas termo-magnéticas representativas de las siete zonas del núcleo compuesto Aljojuca.



**Figura 6.13.** Curvas de IRM representativas de las siete zonas del núcleo compuesto Aljuca.



## 6.6 Resultados de concentración de minerales magnéticos.

Los parámetros de concentración de minerales magnéticos, como la susceptibilidad magnética ( $K$ ), magnetización remanente anhistérica (ARM), densidad, magnetización remanente natural (NRM) y la saturación de la magnetización remanente isoterma (IRM), mostraron un comportamiento similar a lo largo del núcleo compuesto Aljojuca como se ve en la figura 6.14. Para fines prácticos solo se describirá los resultados obtenidos con la susceptibilidad magnética.

Zona I.- En la zona uno las intensidades oscilan del orden de  $200 \times 10^{-6}$  SI hasta alcanzar una intensidad de  $400 \times 10^{-6}$  SI. A los 100 cm existe un bajo de intensidad del orden de  $280 \times 10^{-6}$  SI relacionada con la presencia de una facie del tipo C que su característica principal es el alto contenido de lodos (Véase figura 6.14).

Zona II.-Esta zona alcanza un máximo  $350 \times 10^{-6}$  SI, relacionada con la presencia de facies tipo A que presentan laminaciones y estratos de arenas. En la base se observa una disminución de la intensidad relacionada con la presencia de una tetra (ver figura 6.14).

Zona III.- Caracterizada por intensidad baja en la base del orden de  $200 \times 10^{-6}$  SI concordante con la presencia de un horizonte de tefra como en la zona II. Después existe un incremento en la intensidad del orden de  $260 \times 10^{-6}$  SI debido a la presencia de facies tipo A ( ver figura 6.14).

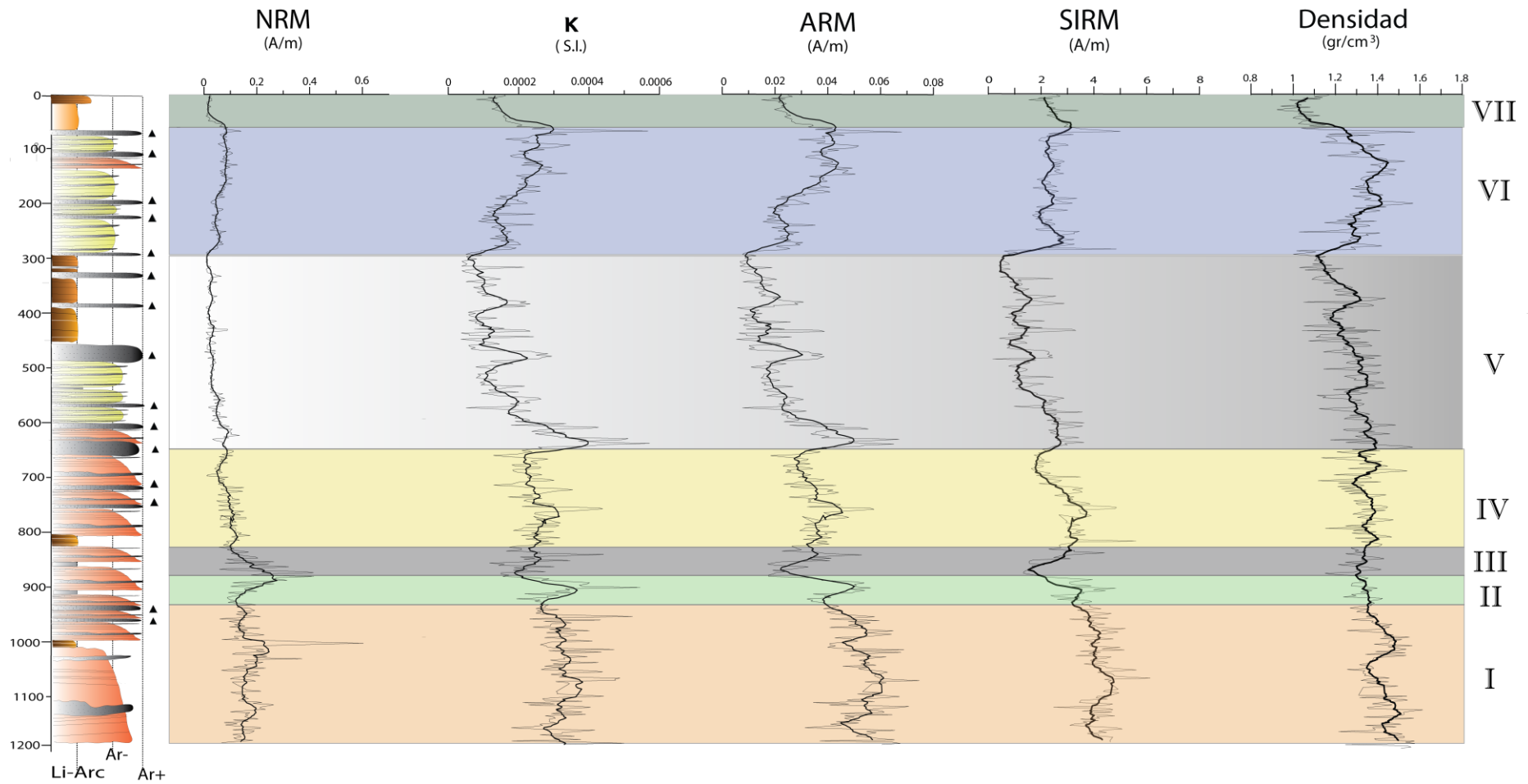
Zona IV.- Esta zona presenta una intensidad promedio del orden de  $220 \times 10^{-6}$  SI y un incremento de intensidad del orden de  $300 \times 10^{-6}$  SI a una profundidad de 758.1 cm relacionada directamente con la presencia de una facie tipo B que esta compuesta únicamente de arenas ( ver figura 6.14)

Zona V.- En esta zona la curva de susceptibilidad presenta una forma característica. En la base muestra una intensidad alta del orden de  $400 \times 10^{-6}$  SI relacionada con una facie del tipo B, después existe una disminución en la intensidad solo interrumpida por el máximos de intensidad a los 480 y 380 cm. La intensidad disminuye hasta casi llegar a 0. Esta disminución de

intensidad se puede asociar al cambio de tipo de facies A y B a facies C y D (ver Figura 6.14)

Zona VI.- Para esta zona el incremento de intensidad es constante llegando hasta  $300 \times 10^{-6}$  SI, este comportamiento se debe al cambio de facies del tipo C y D a facies de tipo B y E , estas últimas presenta una mayor cantidad de arenas.

Zona VII.- Para esta zona la intensidad del parámetro de susceptibilidad decae constantemente hasta a  $100 \times 10^{-6}$  SI tal vez relacionada con la presencia de un estrato masivo formando de lodos principalmente. Este estrato es discordante en características del resto de las demás facies del núcleo.



**Figura 6.14.** Comparación de parámetros magnéticos que dependen de concentración contra la columna estratigráfica del núcleo Aljojuca. La secuencia de parámetros está dividida en siete zonas principales utilizadas para distinguir diferentes características de estas señales.

## 6.7 Resultados tamaño de partícula.

Los parámetros utilizados para determinación de tamaño de partícula como  $ARM/\kappa$ , y  $K_{ARM}/\kappa$ ,  $ARM/IRM$  y  $Hcr/Hc$  muestran un comportamiento similares a lo largo de las siete zonas, como se observa en la Figura 6.15, solo la razón  $Mrs/Ms$  muestra poca resolución debido al escaso número de muestras utilizadas.

El diagrama “Day” muestra una agrupación de las siete zonas en la región del tamaño de partícula PSD mostrado en la Figura 6.16. Para el diagrama “King” muestra que el tamaño de partícula para las siete zonas varía de 0.1 a 0.2  $\mu m$  (ver figura Figura 6.17)

A continuación se describirá la variaciones de tamaño de partícula en las siete zonas.

Zona I.- En esta zona la intensidades de los parámetros son altas mostrando la dominancia de partículas finas de dominio sencillo. Esto puede ser relacionado con la presencia de facies del tipo A y B que contienen alta proporción de arenas (ver Figura 6.15). El diagrama “Day” muestra que los datos se encuentran en la zona de PSD y el diagrama “King” muestra que los tamaños de partícula son de 0.1  $\mu m$ .

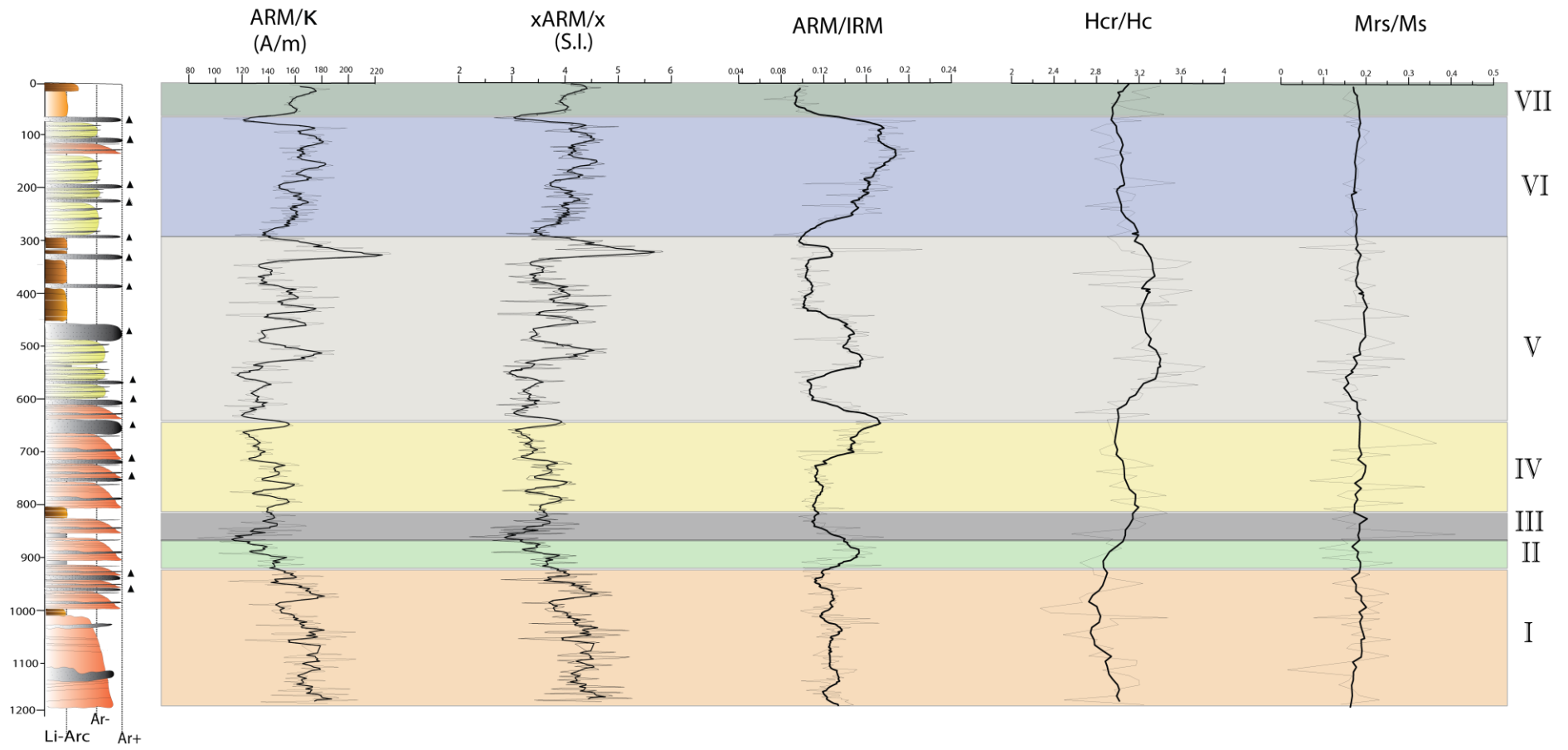
Zona II y III.- Las intensidades de las razones  $ARM/\kappa$ , y  $K_{ARM}/\kappa$  disminuyen drásticamente mostrando un aumento de tamaño de partículas gruesas como MD y disminución de partículas finas. Este aumento de tamaño se puede relacionar con la presencia de dos horizontes de tetras a las profundidades de 853 y 909.2 cm. El diagrama “Day” muestra una agrupación de los datos en la zona de PSD y en el diagrama “King” se muestran tamaños de 0.1  $\mu m$  y 0.2  $\mu m$  para estas dos zonas.

Zona IV.- En esta zona las intensidades de los parámetros  $ARM/\kappa$ ,  $K_{ARM}/\kappa$  y  $Hcr/Hc$  aumentan, mostrando una disminución del tamaño de partícula, debido a la presencia de facies del tipo A. El diagrama “Day” muestra los datos de manera dispersa en la zona de PSD y con el diagrama “King” se observa un tamaño de partícula de menor a 0.1  $\mu m$ .

Zona V.- Las razones  $ARM/k$ ,  $K_{ARM} /k$ ,  $ARM/IRM$  y  $Hcr/Hc$  muestran aumentos y disminuciones de intensidades a lo largo de toda la zona. A partir de los 520 cm se observa un gradual incremento de intensidad hasta alcanzar un máximo antes de los 300 cm reflejando una gradual disminución de tamaño de partícula esto coincide con cambio de facies del tipo A y B a facies C y D. Por otro lado el diagrama “Day” una dispersión de los datos a lo largo de la zona de PSD. El diagrama “King” muestra tamaños de partículas de  $0.1 \mu m$  y  $0.2 \mu m$ .

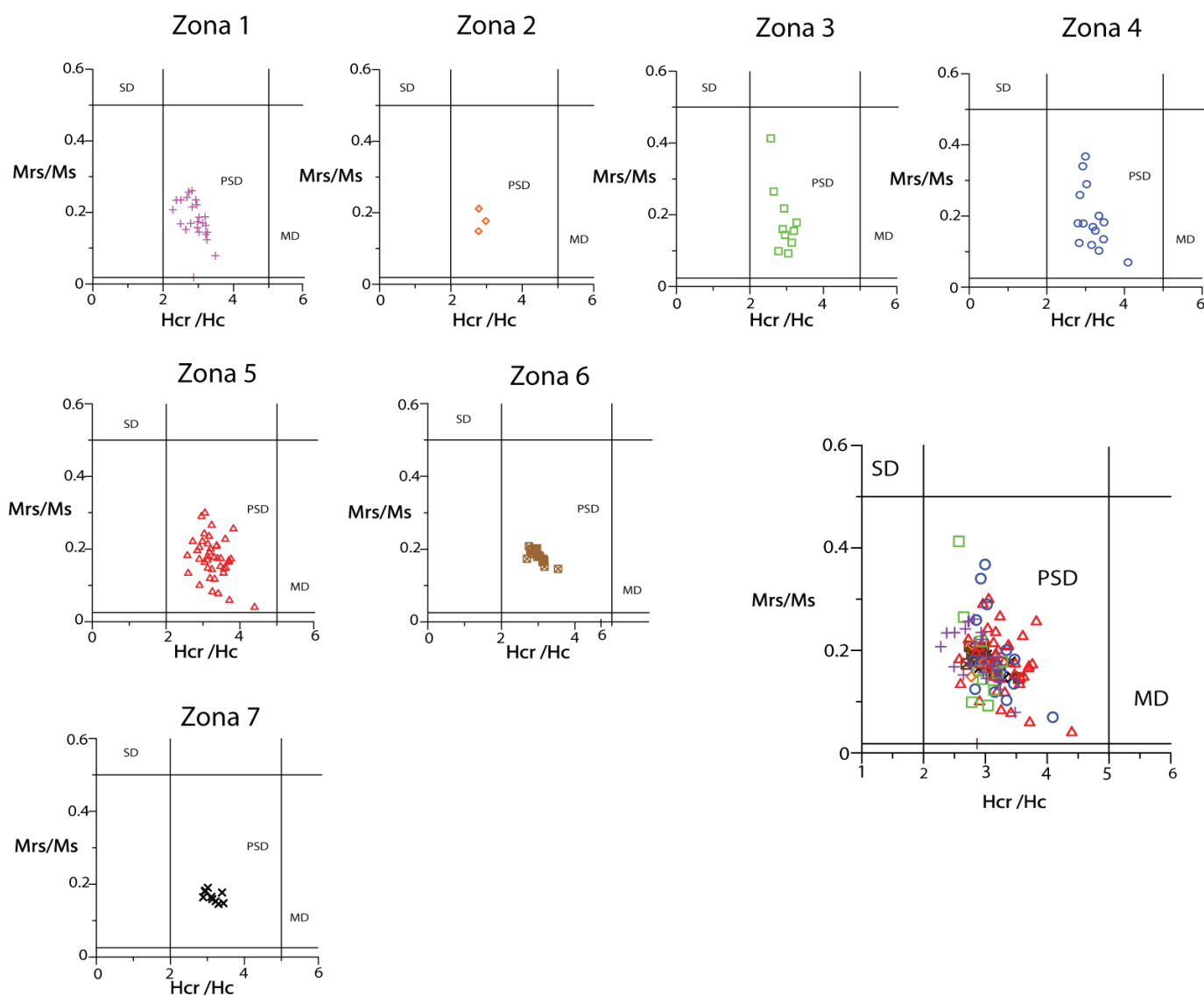
Zona VI.- En esta zona se observa un aumento de intensidad uniforme en los parámetros reflejando una disminución de tamaño de partícula, relacionado con un cambio de facies del tipo C y D al tipo A,B y E. El diagrama “Day” muestra una concentración de los datos con poco dispersión en la zona de PSD. Para el diagrama “King” el tamaño de partícula es de  $0.1 \mu m$ .

Zona VII.- Esta zona esta dominada por la presencia de tamaño de partículas finas debido al aumento de intensidad en parámetros como  $ARM/k$ ,  $K_{ARM} /k$  y  $Hcr/Hc$ . Para el diagrama “Day” muestra una buena agrupacion de los datos en la zona de PSD y el diagrama “King” muestra un tamaño de partícula de  $0.1 \mu m$ .



**Figura 6.15.** Comparación de columna estratigráfica, contra diferentes razones para la identificación de tamaño de partículas.

Gráfico Day



**Figura 6.16.** Gráfico “Day” para cada zona de el núcleo Aljojuca, en la parte inferior se observa un diagrama con el conjunto de las siete zonas.

Gráfico “King”

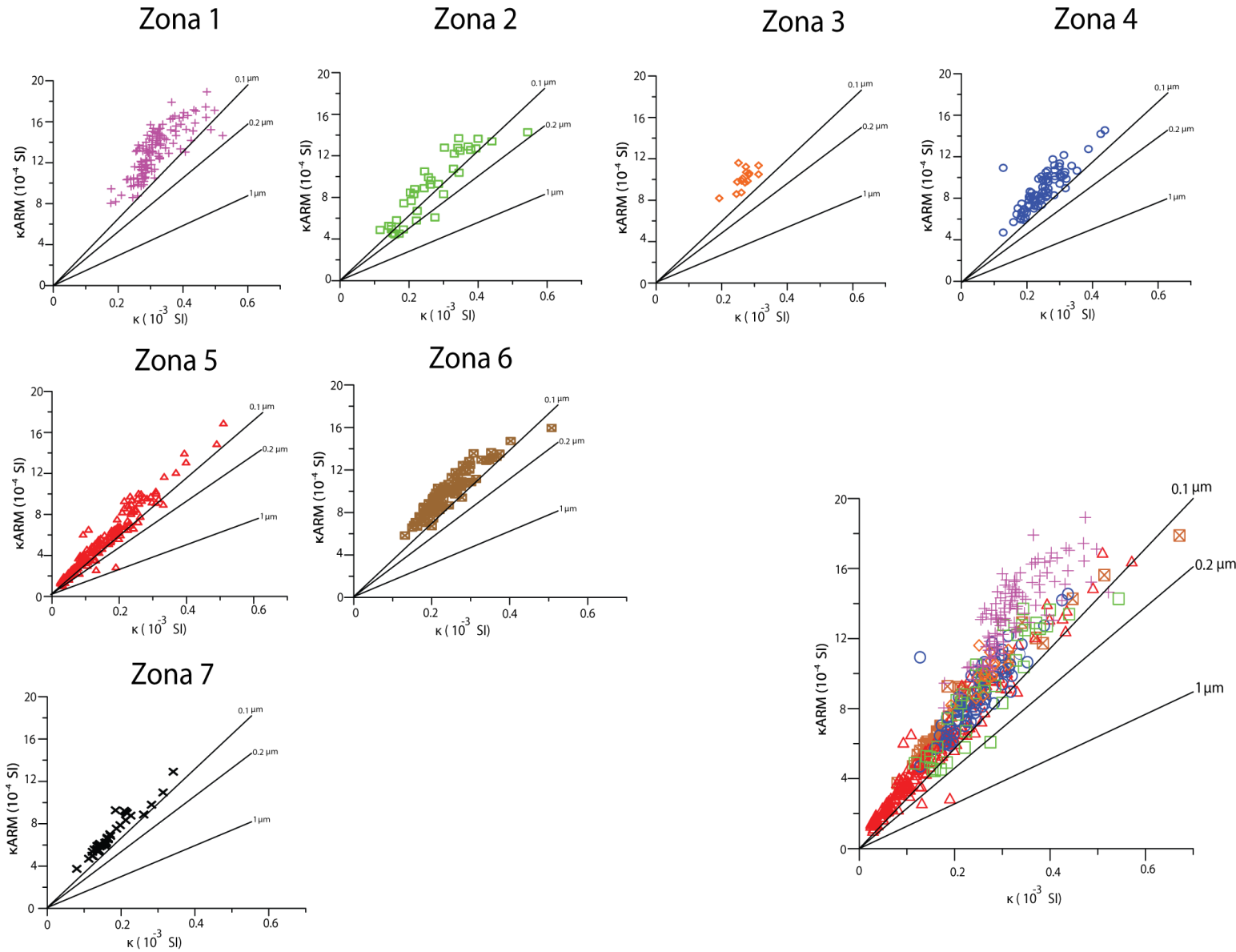


Figura 6.17. Gráfico “King” para las diferentes las zonas del núcleo Aljojuca. En la parte inferior se observan graficadas las siete zonas en un solo diagrama.



## Capítulo 7

### Discusión y conclusiones.

#### 7.1 Discusión direcciones paleomagnéticas.

Para el cráter maar Aljojuca del 80 % de las muestras analizadas se pudo aislar la magnetización característica satisfactoriamente, ya que solo presentaban una componente primaria mostrada por los diagramas de Ziderveld (ver figura 6.8)

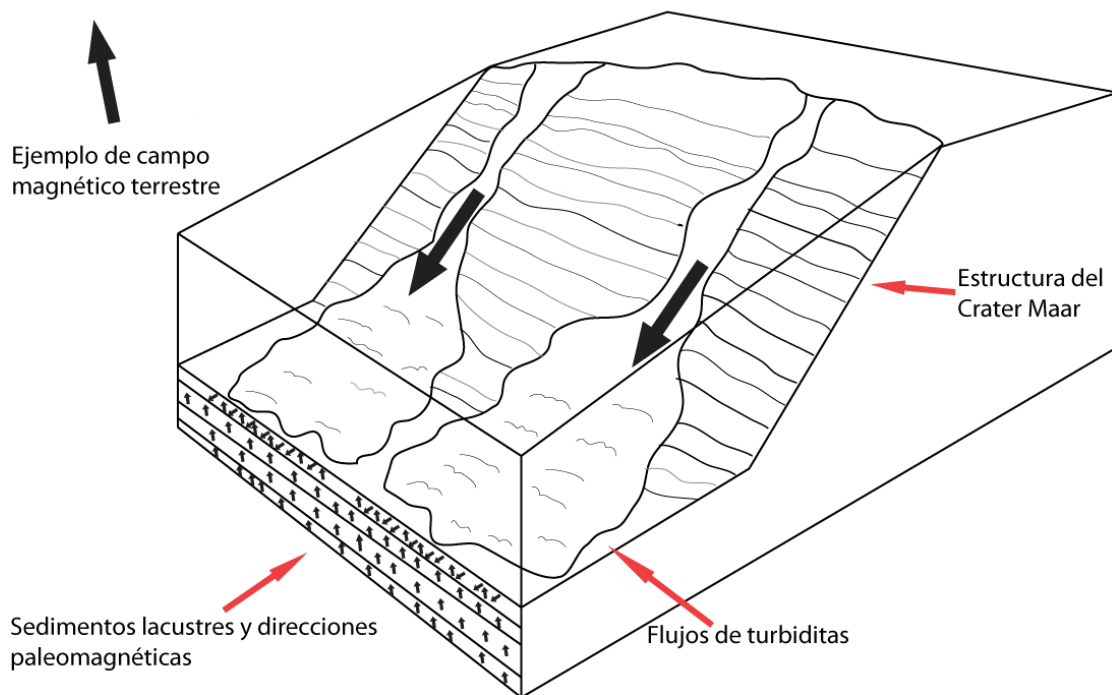
La correlación utilizando los resultados de declinación en inclinación magnética entre los tres núcleos fue nula. Esto puede deberse a que el núcleo del lago muestra secuencias de turbiditas a lo largo de todo el núcleo (facies tipo B) (ver Figura 7.1). Se interpretan como turbiditas debido a las siguientes características:

- Depósitos son compuestos de arenas en su totalidad con gradación normal
- En algunos casos contacto erosivo a la base (ver Figura 7.2).

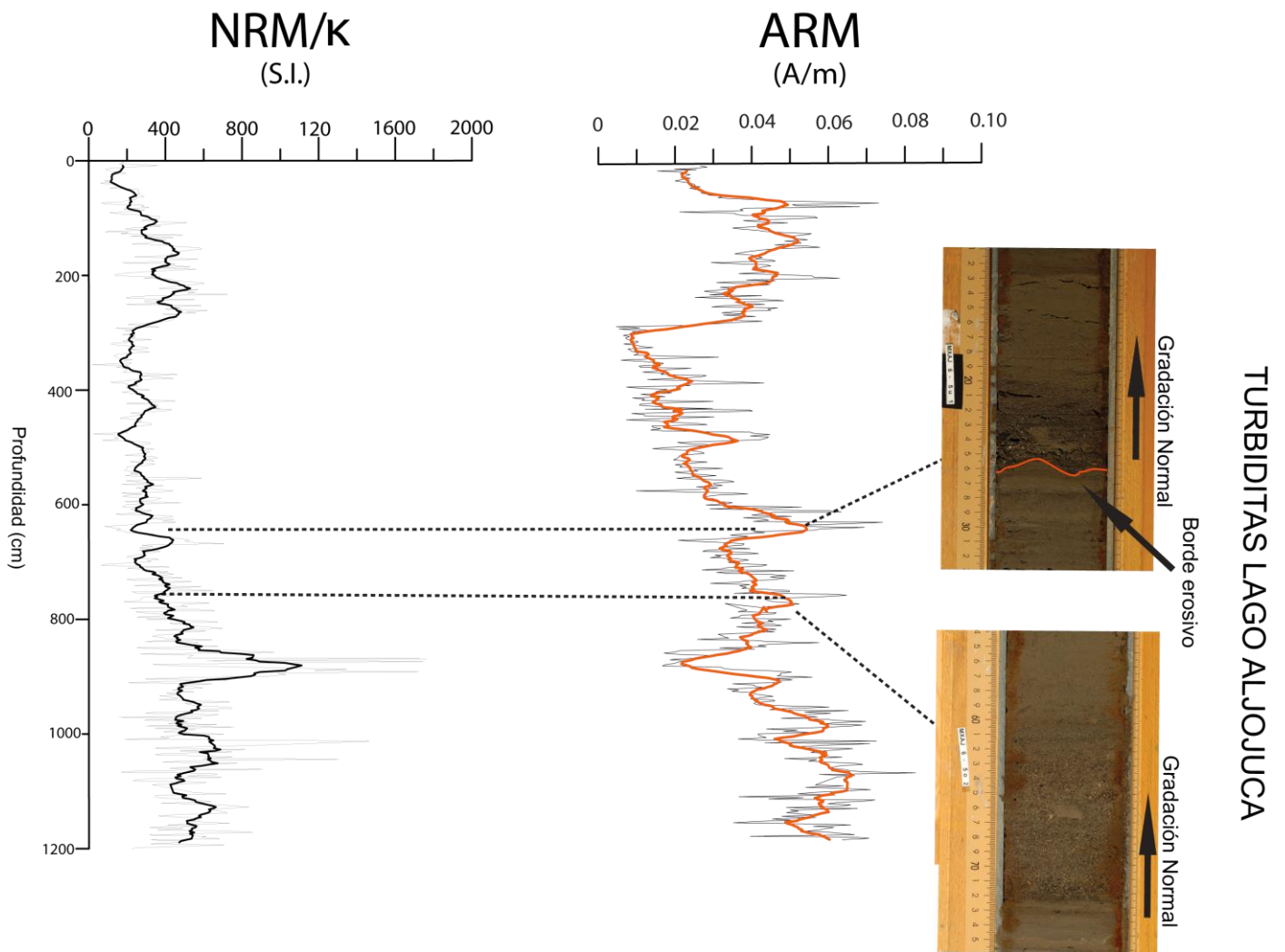
El lago Aljojuca cumple una de las características mas importantes en el registro del campo magnético en sedimentos, que es el alto contenido de magnetita, pero por el estilo de depositación y la abundancia de las facies B, pudieron modificar el registro original de la magnetización característica de los sedimentos.

Otro registro que apoya esta idea es la razón NRM/K. Dicha razón expresa las paleo-intensidades relativas registradas por los sedimentos eliminando la dependencia de concentración. En las profundidades donde se encuentran las secuencias turbiditas, se observan bajas intensidades del parámetro, confirmando que no existe un buen registro del campo magnético en esas zonas (ver Figura 7.2)

## Flujos de turbiditas del lago Aljojuca



**Figura 7.1.** Minerales magnéticos en condiciones de depositación normal de un lago. Se observa que los cristales alcanzan a orientarse con el campo magnético presente, mientras para zonas afectas con corrientes de turbidez los cristales difícilmente se pueden orientar.



**Figura 7.2.** Registro de ARM donde se relaciona las altas intensidades con depósito de turbiditas e intensidades bajas para el registro del parámetro NRM/X . También se observan dos fotos con las principales características de los depósitos de turbiditas como bordes erosivos y la gradación normal.

## 7.2 Discusión parámetros magnéticos.

### 7.2.1 Composición Mineralógica

#### -Curvas de Histéresis

Los parámetros de las curvas de histéresis pueden mostrar composición mineralógica y tamaño de partícula (Tauxe, 2008). Para el núcleo Aljojuca estas curvas se encuentran caracterizadas por una forma estrecha, mostrando valores promedio de coercividad ( $H_c$ ) desde 13.30 hasta 15.8 mT, así como coercividades remanentes promedio ( $H_{cr}$ ) entre 42.44 a 55.90 mT indicando la dominancia de minerales ferromagnéticos como hematita a lo largo de todo el núcleo. Los parámetros como magnetización remanente ( $M_r$ ) y magnetización remanente de la saturación ( $M_{rs}$ ) no pueden ser usados para caracterizar la composición mineralógica del núcleo debido a que las desviaciones estándar para cada una de las zonas es alta y no es representativa (ver Tabla 6.3)

#### -Curvas de IRM

El análisis de las curvas de IRM refleja la contribución de tres componentes principales una de baja coercividad y dos de alta coercividad. Para la componente de baja coercividad la magnetización remanente isotérmica fue alcanzada alrededor de los 300 mT sugiriendo la presencia de magnetita-titanomagnetita. Una de las componentes de alta coercividad muestra campos de saturación superiores a 400 mT, esto puede ser atribuido a la presencia de minerales antiferromagnéticos como hematita.

Frank y Nowaczyk (2008) propusieron que la alta magnetización de bajas concentraciones de magnetita puede enmascarar la presencia de minerales de alta coercividad en experimentos de IRM, histéresis magnética y curvas termo magnéticas. Por esto, es posible que este tipo de minerales se encuentren en mayor proporción en el núcleo Aljojuca pero es difícil identificarlos.

La tercer componente se le puede atribuir al mineral goetita debido a que presenta altas coercividades como hematita, observado en el análisis de componentes de curvas de IRM

### **-Curvas de termo-magnéticas.**

La característica principal de las curvas termo-magnéticas es que la magnetización es minimizada entre los 570 a 580 ° C indicando la presencia de magnetita. Estas curvas no son reversibles, después del calentamiento tienen una saturación de magnetización mas baja que la inicial, indicando la formación de un nuevo mineral por alteración termal y oxidación como mahemita o hematita, así como las transformaciones de fases y reordenamientos magnéticos.

Para La zona I y VII aparte del comportamiento típico de las curvas en el cual la intensidad de magnetización decae a los 580 C, también existen decrementos de intensidad de magnetización entre los 380 y 420 °C esto coincide con la presencia de una tercer componente de alta coervidad en el análisis de curvas de IRM para la zona 1. Por lo que se sugiere la presencia de goetita debido a que es un mineral que presenta altas coercividades y sufre una transformación a hematita debido a las altas temperaturas entre 200 y 400 °C, registrada como un decremento de intensidad en las curvas termo-magnéticas

La zona V exhibe un comportamiento particular a las demás. Existe un decremento de magnetización a los 450 °C y después incrementa la magnetización disminuyendo de nuevo a los 580 ° C . Se interpreta como evidencia de la presencia de pirita que es un sulfuro de hierro y su magnetización decae a los 400 °C (Tudryn et al 2009).

También puede interpretarse como la presencia de pirrotita que es un mineral ferromagnético con una temperatura de Curie de 325 °C. Aunque El decaimiento de magnetización a los 450 °C no coincide con la temperatura curie de pirrotita, esto se puede deber a que este mineral se encuentra

mezclado con otros minerales como magnetita modificando su temperatura Curie.

### **-Razón S**

Los valores de la razón S se encuentran cercanos a la unidad a lo largo de todo el núcleo Aljojuca indicando la dominancia de minerales de baja coercividad como magnetita-titanomagnetita. Solo en las zonas IV (a los 700 cm) y V (a los 450 cm) existe una disminución drástica de hasta 0.8 a 0.85 mostrando la presencia de minerales de alta coercividad como hematita o goetita.

### **7.2.2 Minerales magnéticos del Lago Aljojuca**

A través del estudio de las propiedades magnéticas del núcleo compuesto Aljojuca se pueden observar la presencia de tres tipos de minerales magnéticos. Magnetita y titanomagnetita son los minerales predominantes en el núcleo, mostrado por la baja variación observada en la razón S (Haltia y Nowaczyk, 2009). También observado en las curvas IRM donde las muestras alcanzan la saturación de la magnetización en presencia de campos con valores entre 300 a 350 mT (Thompson y Olfield, 1986), temperaturas de Curie de 580 °C mostradas en las curvas termomagnéticas (Dunlop y Özdemir, 1997) y por último las curvas de histéresis muestran coercividades bajas y una forma estrecha

También se interpreta la presencia de minerales antiferromagnéticos de alta coercividad como hematita y goetita, mostrado por valores de la razón S de 0.8. Valores de saturación de las curvas de IRM mayores a 400 mT y cambios fases por alta temperatura entre los 200 y 400 °C

Por último presencia de sulfuros como pirita ó pirrotita determinada a través de curvas termo-magnéticas, por el comportamiento característico de decremento de magnetización a los 450 °C incremento a los 500 °C y un decremento final de magnetización antes de los 600 °C (Bollin, 1970, Kruczyk, 1983, Strechie, 2002, Tudryn y Tucholka 2004).

### 7.2.3 Concentración

Los parámetros de concentración tienen una relación directa con el tipo de facies en el núcleo Aljojuca. Las facies A y B presenta los mayores valores de susceptibilidad magnética hasta  $600 \times 10^{-6}$  SI. Esto se asocia al alto contenido de arenas provenientes de las paredes del cráter y su roca preexistente. Las altas intensidades se deben a que estas arenas están formadas principalmente de óxidos de hierro como magnetita. Las facies de menor intensidad son las C y D que son caracterizadas por bajos de susceptibilidad magnética de  $50 \times 10^{-6}$  SI. Esto es debido a que estas facies presentan una menor cantidad de arena y se componen de limo y arcilla. Las capas de tefra volcánica (T), presentan los valores mas bajos en los parámetros de concentración. Debido a que están compuestas por esquirlas de vidrio ricas en sílice. Otra idea es que los parámetros de concentración están relacionados directamente con la actividad antropogénica cercana al Lago Aljojuca, como se discute mas adelante

### 7.2.4 Tamaño de partícula.

Los parámetros utilizados para la determinación del tamaño de partícula como  $ARM/\kappa$ ,  $K_{ARM}/\kappa$ ,  $ARM/IRM$  y  $Hcr/Hc$  muestran una señal similar mientras que el parámetro  $Mrs/Ms$  no presenta una señal característica debido al número reducido de muestras.

El análisis de las propiedades magnéticas reflejan que el mineral predominante en los sedimentos del lago Aljojuca es magnetita. Debido a esto las razones como  $ARM/\kappa$ , y  $K_{ARM}/\kappa$ ,  $ARM/IRM$ , pueden mostrar la variabilidad de tamaño de partícula. El decremento de valores de estas relaciones muestra un incremento de tamaño de partícula magnética y mayores valores muestran partículas finas o de dominio sencillo (Tauxe, 2008, Oldfield 1994, Maher, 1988). Las zonas en donde el núcleo Aljojuca muestra un cambio en tamaño de partícula importante es: En la zona V a los 350 cm existen un aumento de intensidad drástico en todos los parámetros y coincide con una disminución de intensidad en todos los parámetros de concentración. Esto se interpreta como una zona de disolución de magnetita

debido a condiciones reductoras, se generó la disminución del tamaño de partícula y decremento de concentración de este mineral. Para la zona VI existe un aumento drástico en las parámetros dependientes de tamaño de partícula y concentración que concuerdan con la tasa mas alta de depositación del núcleo Aljojuca del orden de 14.28 mm/año, se puede atribuir directamente a actividad antropogénica de la zona

Por otro lado el diagrama “Day ” muestra que el tamaño predominante para las restantes zonas del núcleo es PSD. No obstante este diagrama debe ser interpretado con precaución, debido a la variabilidad en la mineralogía magnética, ya que los valores calculados para el diagrama original se calcularon con muestras de magnetita pura (Tauxe, 2008). En el diagrama “King” se observa una distribución lineal de las muestras, interpretado como un tamaño de partícula uniforme sin cambios significativos entre 0.2 y 0.1  $\mu\text{m}$ .

### **7.3 Historia paleoclimática y ambiental del lago Aljojuca.**

Los datos paleoclimáticos disponibles para la zona de Serdán Oriental son escasos, más para los estudios relacionados con sedimentos lacustres, lo que dificulta una interpretación paleoclimática y ambiental. Otro factor importante a considerar al interpretar los datos es la presencia humana, debido a los cambios que pudieran generar en el ambiente.

En base a la información compilada de diversos indicadores ambientales para el centro de México y la estratigrafía magnética del núcleo Aljojuca se estableció la historia paleoclimática y ambiental que a continuación se describe:

1.-De la zona I a la zona IV se observa secuencias rítmicas entre facies A y B (turbiditas) estas muestran un alto contenido de arenas que se relacionan con altos valores de parámetros magnéticos de concentración como  $\kappa$ , ARM e IRM, de acuerdo a la razón S estas altas intensidades son debido a un alto contenido de minerales de baja coercividad como magnetita en estas facies. Estas zonas se interpretan como predominancia de climas húmedos, debido a que la alta frecuencia de precipitaciones generando el deposito de facies tipo A, B y altas tasas de depositación como se observa en el modelo de



edades (2.14 mm al año). Los sedimentos provienen de la erosión de la parte interna del maar. Condiciones climáticas similares fueron observadas en el lago de Páztcuaro a través de isótopos de oxígeno para el periodo comprendido entre 3530-2930 años Cal A.P. Así como en estudios de polen en la zona arqueológica de Tlapocaya para el periodo comprendido entre 4200-2600 años Cal A.P., en la Hoya San Nicolás para el periodo comprendido entre los 9500-3700 Cal años A.P.

Tal vez estas condiciones climáticas fueron óptimas para el establecimiento de los primeros grupos sedentarios en la zona de puebla Tlaxcala a los 4 000 años A.P según García-Cook (1986).

Otra idea es que el depósito de estas facies arenosas se pudo deber a periodos de clima seco, generando tolvánicas depositando grandes cantidades de material a la cuenca del lago.

2.- Para la zona V (Ver Figura 7.3) se observa un cambio de facies del tipo A y B al tipo E, C y D este tipo de facies presentan menor contenido en arenas y mayor proporción de material limo-arcilloso. En los tres parámetros magnéticos de concentración se observa un incremento de sus valores en la base de esta zona (650 cm 2219 años Cal AP) y después un decremento casi continuo, solo marcado por dos máximos uno a los 450 cm y otro a los 380 cm, a esta zona se interpreta de las siguientes dos maneras:

A) La zona V se caracteriza por el decremento de intensidad progresiva en los parámetros dependientes de concentración como K, ARM e IRM llegando hasta valores cercanos a 0, también se observa un cambio en el comportamiento de la curva termo-magnética para esta zona, incrementando su magnetización a los 350 °C disminuyendo a los 450 °C y la disminución de intensidad de la razón S indicando la presencia de minerales de alta coercividad. Este comportamiento indica la presencia de sulfuros paramagnéticos como pirita o pirrotita

El cambio en concentración y mineralogía, se interpreta como el establecimiento de una zona de alta producción en el lago, debido al incremento de temperatura en el ambiente (Dean, 2002) generando una

mayor depositación de materia orgánica en el lago mostrado por bajas intensidades en el parámetro de densidad. La alta cantidad de material orgánico generó condiciones de anoxia, provocando la disolución de magnetita evidenciado por el decremento de intensidad en parámetros dependientes de concentración, disminución de tamaño de partícula observado en los parámetros  $ARM/K$ ,  $K_{ARM} /K$ ,  $ARM/IRM$  y  $Hcr/Hc$ , y por último producción de pirita o pirrotita observada por la curva termo-magnética y disminución de intensidad para la razón S.

Las condiciones ambientales que se interpretan son incremento en la temperatura y anoxia en sedimentos. Por lo tanto el registro climático y ambiental del núcleo del la Aljojuca, para el período comprendido entre 330 d.C al 950 d.C, muestran condiciones cálidas.

Estas concuerdan con el registro de magnetismo ambiental para el Lago Santa María del Oro (Vázquez et al. 2008), registro de isótopos de oxígeno del lago Yuriria (Davies et al. 1995), isótopos de oxígeno del lago de Pátzcuaro (Bridwater et al. 1995), geoquímica de la laguna Juanacatlan (Metcalf et al. 2010), isótopos de oxígeno de la Laguna Punta (Hodell et al. 2005) y el registro de polen de la Hoya de San Nicolás (Park et al. 2005)

Las condiciones de temperaturas calidas en la zona V del núcleo Aljojuca soportan la idea de que el abandono de la Ciudad se debió a una serie de sequías prolongadas, que originaron condiciones difíciles para la agricultura, generando un subministro insuficiente de alimentos para la población de Cantona (de hasta 70 mil pobladores), generando el colapso social, político y militar.

B) La zona V se encuentra afectada directamente por el factor antropogénico, el primer máximo de susceptibilidad a una profundidad de 630 cm a los 2052 Cal A.D. años coincide con el establecimiento de la Ciudad de Cantona (Figura 7.3) a los 470 cm se observa otro máximo en la susceptibilidad que coincide con la época de mayor habitantes en Cantona (50 mil habitantes) (García y Martínez 2008), esto sugiere que los primeros pobladores con sus técnicas primitivas de cultivo y deforestación aumentaron la erosión del suelo

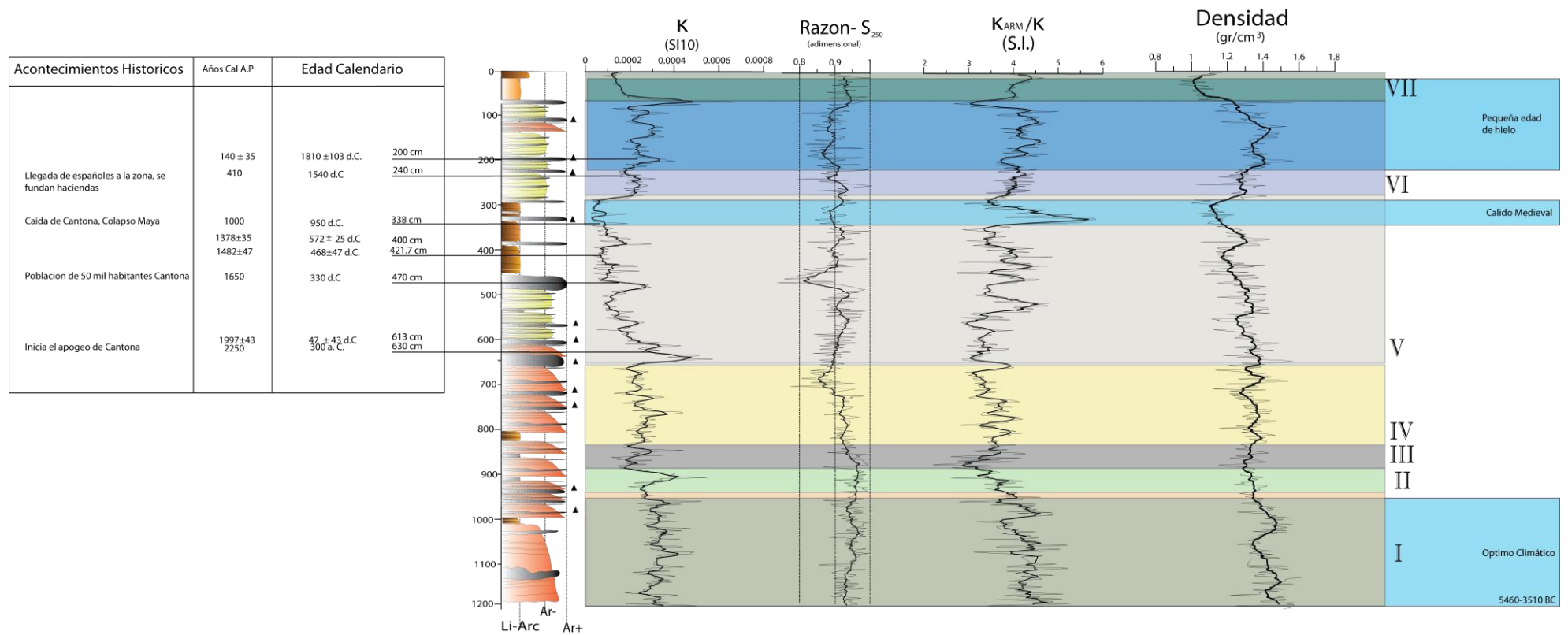
mostrado en disminución de la razón S debido a partículas de hematita provenientes de los suelos erosionados. Con el desarrollo de la ciudad de Cantona, la población siguió en aumento, requiriendo un mayor uso del suelo para cultivo, pero según García Cook (1986) estos pobladores tenían conocimiento de la gran erosión que generaban, por lo que diseñaron estructuras como terrazas, chinampas y sistemas de riego. Con esto lograron controlar el exceso de erosión, mostrado en los registros de este estudio como un decremento en los parámetros de concentración. En la profundidad de 338 cm con una edad inferida de 950 d.C se registra el abandono de Cantona, mostrado por un decremento drástico en los parámetros de concentración magnética. La reducción del número de pobladores de la ciudad causó disminución en la tasa de erosión. Esto concuerda con el modelo de Heine (2003):

Menos gente= menos agricultura → recuperación de bosques y arbustos → menos erosión.

3.- La zona VI está compuesta de facies tipo E predominantemente y facies B, se observa una mayor actividad antropogénica incrementando los valores de parámetros de concentración con respecto a la zona V esto también se ve reflejado en un aumento drástico en la tasa de sedimentación.

Se atribuye a una modificación ambiental en la época de la colonia, debido a que se utilizó otro tipo de sistema de cultivo, como el uso de animales de trabajo, la introducción del arado, aumentando la cantidad de material erosionado. A diferencia de los pobladores prehispánicos estos no trataban de contener el exceso de erosión.

4.- La zona VII (Ver Figura 7.3) muestra un estrato discordante al estilo de depósito del núcleo se interpreta como un derrumbe tal vez generado por un sismo en la zona o un relleno antropogénico, este intervalo no muestra ninguna información climática o ambiental.



**Figura 7.3.** Principales propiedades magnéticas utilizadas para la interpretación climática y ambiental del lago Aljojuca, así como los acontecimientos históricos de interés en el área y eventos climáticos.

## **7.4 Conclusiones**

### **7.4.1 Método de magnetismo ambiental**

El método de magnetismo ambiental probó ser un método económico y rápido debido al gran número de muestras que se analizaron para el presente estudio (1200 muestras). Efectuando mediciones de susceptibilidad magnética, magnetización remanente natural, magnetización remanente anhistórica, curvas de histéresis, curvas de magnetización remanente isotermal y curvas termo-magnéticas, para la obtención de la mineralogía magnética del núcleo compuesto Aljojuca.

### **7.4.2 Modelo de edades**

El núcleo Aljojuca muestra una edad de máxima de 5460 años, estableciéndose un modelo de edades con cuatro fechamientos  $^{14}\text{C}$ , el cual muestra tasas de sedimentación que van de 2.12 mm/año a 14.28 mm/año.

### **7.4.3 Curva de variación secular**

La mineralogía magnética del lago Aljojuca permite un buen registro de magnetización remanente, pero las condiciones de depositación del lago y el tipo de sedimento predominante, generaron modificaciones post deposicionales perturbando el registro magnético original, generando una curva de variación secular poco confiable.

### **7.4.4 Estratigrafía magnética**

De la estratigrafía magnética establecida para el Lago Aljojuca a través de los diferentes parámetros se puede concluir:

#### **-Minerología magnética.**

El mineral magnético predominante en el lago Aljojuca es titanomagnetita-magnetita, determinado por los valores de la razón  $S$  cercanos a uno, valores bajos de coercitividad mostrados en la curva de histéresis, saturación de magnetización alrededor de los 300 mT en las curvas de magnetismo remanente isotermal, y valores alrededor de 550 a 580 °C observados en las

curvas termo-magnéticas. Se observó en menor proporción minerales de alta coercividad como hematita y goetita, mostrado en las variaciones de la razón  $S$ , altas coercividades y curvas termomagnéticas. Aunque estos minerales podrían encontrarse en mayor proporción, las técnicas de análisis son insuficientes para mostrarlo. Por último también se observó la presencia de sulfuros marcado por la forma de la curva termomagnética en la zona V mostrando una temperatura de Curie de  $450^{\circ}\text{C}$

### **-Concentración.**

Los parámetros de concentración de los núcleos, Tlálloc, Ajalapazco y Oriental mostraron un patrón similar, siendo esto útil para establecer una correlación entre estos y construir el núcleo compuesto Aljojuca. Así mismo las tefras identificadas en los tres núcleos sirvieron de marcadores estratigráficos para establecer la correlación.

### **-Tamaño de granos**

Los diagramas utilizados para establecer el tamaño de partícula magnética, como el gráfico King y Day, muestran que el tamaño de partícula predominante en el lago Aljojuca es el de pseudo-dominio sencillo. Razones como  $ARM/K$ ,  $K_{ARM}/K$ ,  $ARM/IRM$  y  $H_{cr}/H_c$ , permitieron la identificación de partículas magnéticas más finas como dominio sencillo como en la zona V.

## **7.4.5 Registro climático ambiental del Lago Aljojuca.**

De la zona I a la zona IV se estableció la dominancia de climas húmedos para la Cuenca de Serdan Oriental, debido a la alta presencia de turbiditas y facies con un alto contenido de arenas. Esto se relaciona directamente con los altos valores ( $500 \times 10^{-6}$  S.I.) en los parámetros de concentración magnética.

Para la zona V se interpretó, con relación a la influencia antropogénica por el uso de suelo y aumento en el número de habitantes de la ciudad de Cantona desde el 330 d.C hasta el 950 d.C. marcado en el registro magnético por los

altos valores en los parámetros de concentración. La disminución de los parámetros magnéticos de concentración se debió al cambio de técnicas para la agricultura que aplicaron los antiguos pobladores para disminuir la erosión de la zona y posteriormente por el abandono de la ciudad. Por otro lado esta zona también se interpreta como condiciones de climas cálidos, debido al establecimiento de una zona de reducción en el lago por la alta cantidad de nutrientes, energía y materia orgánica. Esto mostrado por la disminución de parámetros de concentración, presencia de sulfuros, un decremento marcado en la curva de densidad y disminución del tamaño de partícula.

Para la zona VI el incremento de los parámetros de concentración se interpretó como un aumento de la tasa de erosión debido a factores antropogénicos como el cambio de técnicas de agricultura utilizando arado y animales de trabajo. Por otro lado la zona VII se interpreta como un relleno antropogénico o derrumbe debido a su carácter masivo y características discordantes con el estilo de depositación del lago Aljojuca.

## Referencias

- Acuña R.A., Stahle D., Therrell M.D., Gomez S., Cleaveland M., 2005. Drought, epidemic disease, and the fall of classic period cultures in Mesoamerica (AD 750–950). Hemorrhagic fevers as a cause of massive population loss *Medical Hypotheses* (2005) 65, 405–40
- Battacharya, T., 2012. “ Comunicación personal del fechamiento para la profundidad de 1141 cm”. University of California, Barkeley.
- Bell, M. & Walker, M.J., 2005. *Late Quaternary Environmental Change: Physical and Human Perspectives* (2nd edition). Harlow: Pearson-Prentice Hall (1st edition, 1992). ISBN: 0-1303-3344-1. 348 pages
- Bell, M.G., 2004. Archaeology and green issues. In *A Companion to Archaeology* (edited by J. Bintliff), Blackwell, Oxford, 509–31.
- Berger, A. (1988) Milankovitch theory and climate. *Review of Geophysics*, 26, 624–57.
- Böhnelt, H., Molina-Garza, R., 2002. Secular variation in Mexico during the last 40,000 years. *Phys. Earth Planet. Int.* , 133, 99-109.
- Bollin, E.M., 1970. Chalcogenides In: Mackenzie RC (ed) *Differential*
- Bradley, R. S., and P. D. Jones, (1993). “Little Ice Age” summer temperature variations: Their nature and relevance to recent global warming trends, *The Holocene*, 3, 367– 376, 1993.
- Bridgwater, D., Allaart. J.H, 1997. Sand deserts Turing glacial maximum and climatic optimum geological Survey of greenland ostervoldgade 10 copen hagen Danmark.
- Bridgwater, N.D., 1995. Non-marine ostracods as indicators of Holocene
- Butler. R. E 1998. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*. Blackwell Scientific Publ.. Boston. 319 pp.



- Butler, Robert F. (1992). *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Boston ; Oxford : Blackwell Scientific,
- Butzer K.,W., 1992. *The Americas before and after 1492: Current Geographical Research* (Editor). Oxford and Cambridge MA: Blackwell Publications, 1992, 226 pp
- Caballero, M., Vilaclara G., Rodríguez A., Juárez, D., 2003. Short-term climatic change in lake sediments from lake Alchichica, Oriental, *Journal: Geofísica Internacional*. Vol: 42 Issue: 3 Pages/record No.: 529-537
- Chaparro, M., Bohnel, H.,Byrne R.,Nowaczyk, N. Molina-Garza, R., Park, J., and Negendank J.,2008. Paleomagnetic secular Variation and rock magnetic Studies of Holocene sediments from a maar lake ( Hoya de San Nicolas) in Central Mexico., *Geophys. J.* 175, 462-476
- Claussen, M., Kubatzki, C., Brovkin, V., Ganapolski A., 1999. "Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the mid-Holocene; *Geophysical research letters*, vol 0 No.0 Pags0-0.
- Collison, D. W., 1983. *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism. Techniques and Instrumentation*, XIV + 503 pp., numerous figs. London: Chapman & Hall.
- Crowley, T.J. and Lowery, T.S. 2000. How warm was the Medieval Warm Period? *Ambio*, 29, 51–4.
- Curtis Jason H., David A. Hodell and Mark Brenner, 1996. "Climate variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the past 3500 years, and implications for Maya cultural evolution", *Quaternary Research* 46: 37-47.
- Davies, H.L.,1995. *Quaternary palaeolimnology of a Mexican crater lake*. Ph.D. Thesis, Kingston University
- Dean, W., 2002, A 1500-year record of climatic and environmental change in Elk Lake, Clearwater County, Minnesota II: geochemistry, mineralogy, and stable isotopes: *Journal of Paleolimnology*, 27,301-319.

- Deevey. E., S., 1944. Pollen analysis and Mexican archaeology: an attempt to apply the method. *American Antiquity* 10:135-149
- Dekkers, M.,J., 1997. Environmental Magnetism: An Introduction. *Geologie En Mijnbouw-*
- DeMenocal, P., B., 2001. 'Cultural responses to climate change during the Late Holocene', *Science* 292, 667–673
- Douglas, M., W., R. A. Maddox, K. Howard & S. Reyes. 1993. The Mexican monsoon. *J. Climate* 6: 1665–1677.
- Dunlop, D. and Özdemir, O., 1997. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge University Press.
- Englehart, P. & A. R. Douglas., 2001. The role of eastern north Pacific tropical storms in the rainfall climatology of western Mexico. *Int. J. Climatol.* 21: 1357–1370.
- Evans, Michael E.; Heller, Friedrich., 2003. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*.
- Frank, U. & Nowaczyk, N., 2008. Mineral magnetic properties of artificial samples systematically mixed from haematite and magnetite, *Geophys. J. Int.*, 175, 449–461.
- García C.A., Martínez C. Y., 2005. Proyecto Arqueológico Cantona y del Norte de la Cuenca de Oriental: "Informe de los trabajos en campo llevados a cabo en la temporada 2004". Archivo Técnico de la Coordinación Nacional de Antropología, INAH, Mexico.
- García C.A., Martínez C. Y., 2008. Las vías de circulación interna en Cantona. *Arqueología* 38: 125-160.
- García C.A., 1986. El control de la erosión en Tlaxcala; un problema secular: *Erdkunde*.40, 251-262.

- García C.A., 1996b. Proyecto Arqueológico Cantona: Informe General, 1993-1996. Archivo Técnico de la Coordinación Nacional de Arqueología. INAH, Mexico.
- Gasca-Durán, A., 1981. Algunas notas de la génesis de los lagoscráter de la Cuenca de Oriental, Puebla-Tlaxcala-Veracruz. INAH, Colección Científica, Prehistoria, 98. México, D. F.
- González Q.,L.,1986. Análisis polínicos de los sedimentos. en Lorenzo, J. L., Mirambell, L. (Eds.), Tlapacoya 3500 años de historia del lago de Chalco.. Instituto de Antropología e Historia, México:157-166.
- Grove, J.M., and Switsur., R., 1994. Glacial geological evidence for the medieval warm period., *Clim Change*, 26, 143-169
- Haltia.,H, E, Nowaczyk N., Saarinen T., Plessen B. 2010.Magnetic properties and enviromental changes recored in lake Lehmilampi(Finland) Turing the Holocene. *J Paleolimonol.*,23:1-13
- Hambrey, M. & Alean, J. 2004. *Glaciers*, 2nd ed. xviii + 376 pp. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University
- Hammarlund, D., Björck, S., Buchardt, C., Israelson, C. and Thomsen, C.T. 2003. Rapid hydrological changes during the Holocene revealed by stable isotope records of lacustrine carbonates from Lake Igelsjön, southern Sweden. *Quaternary Science Reviews*, 22, 353–70.
- Heine, K., 1988. Late Quaternary glacial chronology of the Mexican volcanoes. *Geowissenschaften* 6, 197-205.
- Heine, K., 2003. Paleopedological evidence of human-induced environmental change in the Puebla-Tlaxcala are (Mexico) during the last 3,500 years. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20, 235-244.
- Hodell, D.A, Brenner., M., Curtis J.H.,2005. Climate and cultural history of the Northeastern Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico, *Climatic Change* (2007) 83:215–240

Hodell, D.A., Curtis, J.H., and Brenner, M., 1995. Possible role of climate in the collapse of classic Maya civilization: *Nature*, v. 375, p. 391– 394, <http://climate.nasa.gov/>

IPCC. 2007: Summary for Policymakers. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.

Johnsen, S., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Steffensen, J.P., Clausen, H.B., Miller, H., Masson-Delmotte, V., Sveinbjörnsdóttir, A.E. and White, J. 2001. Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3,

Kirschvink, J.L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, v.62, p.699-718

Kruiver, P.P., Dekkers, M.J., Heslop, D., 2001. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation, *Earth and Planetary Science Letters*, Pages 269-276

Kruczyk, J., 1983. Phase transitions in iron oxides and sulphides and their relations to magnetic properties of rocks. *Publ Inst Geophys Pol Acad Sci C-15* 164:3–92

Lachniet, M.S., Bernal J.P, Asmerom Y, Polyak V. and Piperno, D. 2012. A 2400 yr Mesoamerican rainfall reconstruction links climate and cultural change, *Geology* published online 23 January 2012.

Liski, J., Ilvesniemi, H., Mäkelä, A. and Westman C.J. 1999. CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to climatic warming are overestimated—The decomposition of old organic matter is tolerant to temperature. *Ambio* 28, 171–174.

Lorenz, V., 1986. On the growth of maars and diatremes and its relevance to the formation of tuff rings. *Bull. Volcanol.* 48, 265–274.

Nagata, T., 1961. *Rock Magnetism*. Maruzen, Tokyo.

- Maher, B., 1988. Magnetic properties of some synthetic submicron magnetites, *Geophys. J.*, 94, 83–86.
- Mann, M., E., 2002. Medieval climatic optimum. Environmental change in Mexico. Ph.D. Thesis, Kingston University. *Encyclopedia of global environmental change* pp 514-516.
- Metcalf, S., E., 2006. Late Quaternary environments of the northern deserts and Central Transvolcanic Belt of Mexico: *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 93, 258-273.
- Metcalf, S., E., Jones M., D., Davies, S., J., Noren A. and Mackenzie A., 2010. Climate variability over the last two millennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de Juanacatlán, Mexico, *The Holocene*
- Metcalf, S., E., O'Hara, S., L., Caballero, M., Davies, S., J., 2000. Records of Late Pleistocene-Holocene climatic change in Mexico - a review: *Quaternary Science Reviews*, 19, 699-721.
- Millon R., Drewitt B, Cowgill G., 1973. Urbanization at Teotihuacan. V. I. The Teotihuacan Map. Part 2, University of Texas Press, Austin
- Mingram, J., Negendank F W., Achim B., Dieter B., Hendirch A., Ko M., Usinger H., 2006. Long cores from small lakes—recovering up to 100 m-long lake sediment sequences with a high-precision rod-operated piston corer (Usinger-corer)., *J Paleolimnol* (2007) 37:517–528
- Nixon, T.G., 1989. The geology of Iztaccihuatl Volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and Valley of Mexico. Geological Society of America, Special Paper 219, 58 pp.
- Oldfield, F., 1991. Environmental magnetism—a personal perspective. *Quaternary Science Reviews* 10, 73–85.
- Oldfield, F., 1994. Toward the discrimination of fine-grained montano del Cantine Ticinio su substrati ricchi di carbonati. ferrimagnets by magnetic measurements in lake and nearMitt.

- Ortega-Guerrero, B., 1992. Palaeomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del Cuaternario tardío en el Lago de Chalco, Cuenca de México, PhD thesis. UNAM, Mexico City, 161 pp.
- Park, J., 2005. Holocene climate change and human environmental impacts in Guanajuato, Mexico, PhD thesis, University of California, Berkeley, 150 pp.
- Rivera-Uria M, Sedov S., Solleiro-Rebolledo E., Pérez J., McClung E, González A. y Gama-Castro J., 2007. Degradación ambiental en el valle Teotihuacan: evidencias geológicas y paleopedológicas. Boletín de la sociedad geológica mexicana. volumen 59, NÚM. 2, P. 203-217
- Robertson, D. J. France, D. E., 1994. Discrimination of remanence-carrying minerals in mixtures, using isothermal remanent magnetisation acquisition curves. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*(84): 223-234
- Stechie C, Andre F, Jelinowska A, Tucholka P, Guichard F, Lericolais G, Panin, N., 2002. Magnetic minerals as indicators of major environmental change in Holocene Black Sea. *Journal of Quaternary Science* 17: 103-112
- Stuiver, M. y Polach, H., 1977. Discussion: reporting of <sup>14</sup>C data. *Radiocarbon* 19: 355-363.3
- Stuiver, M., Reimer, P.J. & Reimer, R.W., 2005. CALIB 5.0 [www program and documentation
- Stuiver, M., Polach, H.A., 1977. Reporting of <sup>14</sup>C-Data. *Radiocarbon* 19, 355–363.
- Tauxe, L. 2008. *Essentials of Paleomagnetism*, Web 1.0 Edition, <http://magician.ucsd.edu/Essentials/>
- Thompson, R. and Oldfield, F. (1986). *Environmental Magnetism*. George Allen & Unwin, London.
- Thompson, R., S., Whitlock, C., Bartlein, P.J., Harrison, S.P. and Spaulding, W.G. 1993. Climatic changes in the Western United States since 18,000 B.P. In *Global Climates since the Last Glacial Maximum* (edited by H.E. Wright, Jr, J.E. Kutzbach, T. Webb III, W.F. Ruddiman, F.A. Street-Perrott and P.J. Bartlein), University of Minnesota Press, Minneapolis, 514–35.

Tudryn, A. Tucholka P., Gibert E., Gasse F., Wei K., 2009. A late Pleistocene and Holocene mineral magnetic record from sediments of Lake Aibi, Dzungarian Basin, NW China. *Paleolimnol* (2010) 44:109–121.

Vázquez–Castro, G., Ortega–Guerrero, B., Rodríguez, A., Caballero, M., Lozano–García, S., 2008, Mineralogía magnética como indicador de sequía en los sedimentos lacustres de los últimos ca. 2600 años de Santa María del Oro, occidente de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 21–38.

Vazquez. G, Ortega B., Davies S., Aston B., 2010. Registro sedimentario de los últimos ca. 17000 años del lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 62, núm. 3, p. 325-343*

Vazquez Selem, L., 1991. Glaciaciones del Cuaternario tardío en el volcán Teyotl, Sierra Nevada. *Investigaciones Geográficas, Instituto thermal analysis, vol 1. Fundamental aspects. University of California, p. 432.*

Vazquez Selem, L., 1997. Late Quaternary glaciations of TeHyotl volcano,

Verosub, K. L., and Roberts, A. P. (1995). Environmental magnetism: past, present and future. *Journal of Geophysical Research* 100, 2175–2192. R.

Walker, M.J.C., Björck, S., Lowe, J.J., Cwynar, L.C., Johnsen, S., Knudsen, K-L., Wohlfarth, B. and INTIMATE Group 1999. Isotopic ‘events’ in the GRIP ice core: a stratotype for the Late Pleistocene. *Quaternary Science Reviews*, 18, 1143–51.

Watts, A.W., Bradbury, J.P., 1982. Paleoeological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican Plateau and at Chalco in the basin of Mexico: *Quaternary Research*, 17, 56-70

Wright, HE, Cushing EJ, Livingstone D.A. 1965. Coring devices for lake sediments. In: Kummel B, Raup DM (eds) *Handbook of palaeontological techniques*. Freeman, San Francisco, pp 494–520

[www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)

Yañez- García, C., 1982. Exploración de la Región Geotérmica Los Humeros-  
Las derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. Comisión Federal de  
Electricidad. 96 p.