

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

ESTUDIOS ARQUEOMAGNETICOS EN: LA CIUDADELA,  
SIERRA DE LAS NAVAJAS Y XALASCO, CULTURA  
TEOTIHUACANA

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA:

**ANUAR GABRIEL TERÁN GUERRERO**

DIRECTORA DE LA TESIS:  
DRA. ANA MARÍA SOLER ARECHALDE

MÉXICO D.F.

Enero de 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.

# Índice General

---

PRESENTACIÓN .....	3
INTRODUCCIÓN .....	5
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN AL MAGNETISMO.....	8
1. Bases generales del magnetismo .....	8
1.1 Campo magnético.....	8
1.2 Momento magnético.....	9
1.3 Flujo magnético.....	9
1.4 Energía magnética .....	10
1.5 Magnetización y susceptibilidad magnética .....	11
1.6 Relación entre B y H .....	12
1.7 Potencial magnético .....	13
CAPÍTULO 2. GEOMAGNETISMO .....	15
2.1 Origen del campo magnético terrestre.....	19
CAPÍTULO 3. MAGNETISMO DE LAS ROCAS .....	21
3.1 Magnetismo inducido y remanente .....	21
3.2 Fábrica y anisotropía .....	24
3.3 Magnetización de los materiales .....	26
3.4 Energía magnética y estabilidad magnética.....	27
3.5 Susceptibilidad magnética .....	30
3.5.1 Susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura .....	31
3.6 Anisotropía de susceptibilidad magnética y dominios magnéticos .....	32
3.6.1 Medición de la anisotropía de susceptibilidad magnética .....	37
3.6.2 Análisis estadístico de la anisotropía de susceptibilidad magnética .....	39
3.6.3 Técnicas de desmagnetización .....	44
3.6.4 Cálculo de una dirección paleomagnética .....	48
3.6.5 Diagramas de Zijderveld y círculos de remagnetización.....	49
3.6.6 Líneas y planos de mejor ajuste.....	54
3.7 Histéresis magnética.....	57
3.7.1 Caracterización del material: Diagrama de Day.....	58
3.8 Medición de la magnetización remanente .....	59
CAPÍTULO 4. ARQUEOMAGNETISMO.....	61
4.1: Datación arqueomagnética: Sistema cronométrico .....	62
4.1.1 La curva de variación secular de Mesoamérica y el programa REN-DATE .....	65
4.2 Recolección de muestras .....	69
4.2.1 Contenido mineral de las muestras.....	71
4.2.2 Grado de exposición al fuego .....	72
CAPÍTULO 5. SITIOS DE ESTUDIO Y PROBLEMAS A RESOLVER .....	74
5.1 La Ciudadela en Teotihuacan (Estado de México) .....	75
5.2 Xalasco (Tlaxcala) .....	82
5.3 Sierra de las Navajas (Hidalgo) .....	84
5.4 Problemas a resolver .....	87
CAPÍTULO 6. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	89
6.1 La Ciudadela en Teotihuacan (Estado de México) .....	89
6.1.1 Recolección de las muestras.....	89
6.1.2 Localización de las muestras .....	90
6.1.3 Preparación y procesamiento de las muestras .....	95

6.2 Xalasco (Tlaxcala) ..... 105  
6.2.1 Recolección de las muestras ..... 105  
6.2.2 Localización de las muestras ..... 106  
6.2.3 Preparación y procesamiento de las muestras ..... 109  
  
6.3 Sierra de las Navajas (Hidalgo) ..... 118  
6.3.1 Recolección de las muestras ..... 118  
6.3.2 Localización de las muestras ..... 119  
6.3.3 Preparación y procesamiento de las muestras ..... 121  
  
6.4 Estudios magnéticos complementarios ..... 129  
  
CAPÍTULO 7. RESULTADOS ..... 139  
  
CONCLUSIONES ..... 146  
  
REFERENCIAS ..... 150

# Presentación

---

El objetivo general de esta tesis fue datar pisos quemados y no quemados de tres sitios arqueológicos de la cultura teotihuacana por medio del método arqueomagnético.

En los capítulos 1 y 2 se describen los principios físicos básicos del magnetismo y también se hace una revisión general de los conceptos más importantes del campo magnético terrestre: su posible origen, su estructura, así como sus características tanto espaciales como temporales.

El capítulo 3 contiene una descripción del magnetismo de las rocas, los tipos de magnetización y las características de los materiales que son susceptibles a esta. También se aborda la teoría Néel que describe el tiempo de decaimiento de la magnetización de acuerdo a las características granulométricas del material, así como los fundamentos de la técnica de anisotropía de susceptibilidad magnética y el método estadístico para analizar los conjuntos de datos que proporciona dicha técnica. Este capítulo concluye con una descripción de los fundamentos de la teoría de histéresis magnética y su utilidad en los estudios arqueomagnéticos.

El capítulo 4 es una introducción al arqueomagnetismo. Se menciona brevemente el desarrollo histórico, la efectividad de las técnicas de datación por este método y la forma de recolección de muestras arqueomagnéticas. En este capítulo se hace la descripción del método de datación arqueomagnética.

En el capítulo 5 se describe la importancia arqueológica de los tres sitios de donde se obtuvo el material estudiado: La Ciudadela en Teotihuacan (Estado de México), Xalasco (Tlaxcala) y Sierra de las Navajas (Hidalgo). Con los intervalos de tiempo obtenidos, se mejora la cronología de la cultura teotihuacana que, en

muchos sitios no ha podido detallarse debido a la falta de elementos arqueológicos por destrucción, por contaminación o simplemente por ausencia de los mismos.

El capítulo 6 se dedica a la descripción del método de recolección de las muestras así como la localización de las mismas, se presenta también el número de muestras colectadas y su localización en cada uno de los tres sitios estudiados, así como el número de especímenes analizados, su preparación en el laboratorio y el procesamiento estadístico de los datos de las señales magnéticas tanto del material quemado como del no-quemado. Se presentan las gráficas de inclinación, declinación y combinada con los diferentes intervalos en tiempo, así como los intervalos de tiempo producto de la intersección del valor medio obtenido en los cálculos previos con la curva de variación secular de las diferentes muestras analizadas de los tres sitios arqueológicos descritos en el capítulo 5. Finalmente se presentan las gráficas de los estudios magnéticos complementarios con los que se obtuvo información característica de los minerales magnéticos presentes en el material arqueológico estudiado y las gráficas producto del experimento de ciclos de histéresis magnética y magnetización remanente isoterma a temperatura ambiente, por medio de los cuales se analizó el tipo de dominio magnético en el que están organizados los minerales magnéticos contenidos en las muestras con las que se trabajó.

En el capítulo 7 se presentan los resultados obtenidos y se discuten de los mismos.

# Introducción

---

Actualmente, los estudios arqueológicos aplican metodologías interdisciplinarias en los sitios recientemente excavados y en aquellos en los que todavía no se concluyen las investigaciones. En dichos estudios se integra información química procedente de los recubrimientos de los muros y pisos así como de los fondos de las vasijas; con datos de polen, fitolitos y semillas para estudiar la flora; restos óseos de fauna para evaluar el recurso animal; osteología humana para comprender la morfología, patologías y prácticas culturales de los habitantes de los sitios arqueológicos estudiados, genética sobre restos óseos para establecer posibles lazos de parentesco, determinación de paleodieta por isótopos en huesos, varias técnicas de datación, así como el estudio del contexto arqueológico (cerámica, obsidiana, huesos, concha, etc.), (Manzanilla, 2006).

El arqueomagnetismo investiga la historia del campo magnético terrestre, en los términos de las variaciones en dirección e intensidad que ha experimentado en el pasado, sirviéndose de materiales arqueológicos que han sufrido procesos de calentamiento de alta temperatura (>300 - 400 °C). Más en concreto, los materiales de interés son arcillas cocidas (ladrillos, tejas, adobes, cerámicas) y sedimentos quemados *in situ* por la presencia de hogares, tumbas de incineración y otras estructuras de combustión.

El principio del arqueomagnetismo se basa, por un lado en el estudio de las peculiaridades del campo magnético terrestre y por otro en las propiedades magnéticas de algunos minerales de hierro que se encuentran comúnmente en los materiales mencionados anteriormente. Por encima de cierta temperatura llamada temperatura de Curie, los materiales “graban” el magnetismo presente en ese instante. El campo magnético de la Tierra no es constante, por lo que conociendo como ha variado a través del tiempo es posible datar la elaboración de estos materiales.

En los inicios de la era cristiana ocurrió un fenómeno singular en México: El surgimiento de la primera ciudad en el centro de México que se convirtió en la urbe más grande y desarrollada en Mesoamérica: Teotihuacan. Todavía la arqueología sigue buscando las respuestas a interrogantes como los factores que permitieron esta extraordinaria expansión, cuáles fueron sus antecedentes y características, cómo se mantuvo su crecimiento en el transcurso de los siglos, qué causó su declinación y el abandono de la metrópoli.

No hay duda de que Teotihuacan tuvo una importancia fundamental durante el periodo Clásico del centro de México (1-750 d.C.), periodo en el que se expande su influencia y presencia en diversas regiones mesoamericanas, y en el que convivió con ciudades como Cholula (Puebla), Monte Alban (Oaxaca), Maticapan (Veracruz), Palenque (Chiapas), Kaminaljuyú, Tikal y Uaxactún, en Guatemala, Copán, en Honduras, y muchas otras más. (Matos Moctezuma, 2009)

En la literatura sobre los estudios arqueológicos de los sitios que aún están explorándose y estudiándose se refiere ampliamente los problemas para establecer márgenes cronológicos de las edificaciones encontradas sobre todo debido a la falta de excavación en el interior de las mismas para rescatar materiales susceptibles de ser datados o también debido a la destrucción parcial o total de las construcciones anteriores o cercanas al basamento, por lo que no es posible rescatar material suficiente para realizar análisis de  $^{14}\text{C}$ . Otras veces ocurre que la naturaleza química de las muestras rescatables de las excavaciones impide la datación certera del material por técnica de radiocarbono debido a la contaminación de las muestras. En todos estos casos, la datación por método arqueomagnético se convierte en una herramienta indispensable en los estudios cronológicos de los sitios de interés arqueológico.

El objetivo primordial de esta tesis es ofrecer intervalos de tiempo a los contextos arqueológicos de tres sitios de la cultura teotihuacana.

El primer sitio se ubica en la zona ceremonial “La Ciudadela” ubicada dentro de la zona arqueológica de Teotihuacan en el Estado de México, las muestras para este estudio fueron tomadas en diciembre de 2005. El

segundo sitio corresponde a la zona habitacional y talleres de mineros en Sierra de las Navajas, Hidalgo, las muestras fueron colectadas en diciembre de 2006. El tercer sitio corresponde a Xalasco, Tlaxcala, muestreado en diciembre de 2008. De dichos estudios se obtuvieron las dataciones arqueomagnéticas mediante variación secular registrada en pisos quemados y no quemados así como la medición de las propiedades magnéticas de los mismos. Se espera que, con los resultados de la primera parte del estudio arqueomagnético presentados en esta tesis, se logre una mejor comprensión del desarrollo temprano de Teotihuacan por parte de los arqueólogos.

Los estudios realizados en Sierra de las Navajas ayudarán a conocer cómo fue el desarrollo de la zona de producción de obsidiana para Teotihuacan, mediante el análisis de diferentes etapas de ocupación. Por otra parte, los resultados de los estudios arqueomagnéticos en Xalasco permitirán entender el papel de este enclave teotihuacano en la ruta de comercio hacia el Golfo de México durante el florecimiento y expansión de dicha cultura.

Los resultados presentados en esta tesis fueron cotejados con información arqueológica y mostraron una buena correlación, limitando aún más los períodos de ocupación que los obtenidos mediante técnicas de radiocarbono, lo que permite suponer que servirán para construir una cronología más detallada de la dinámica de los sitios estudiados.

# Capítulo 1. Introducción al Magnetismo

---

## 1. Bases generales del magnetismo

En esta sección se hace una revisión de los principios físicos básicos del magnetismo: qué son los campos magnéticos, cómo se producen y cómo se miden.

### 1.1 Campo magnético

Un campo magnético es la influencia magnética de corrientes eléctricas y materiales magnéticos. El campo magnético en cualquier punto posee tanto dirección como magnitud (o intensidad), por lo que un campo magnético también es un campo vectorial. El campo magnético es más comúnmente definido en términos de las cargas eléctricas que los generan.

La magnitud del campo magnético  $H$  es proporcional a la fuerza de la corriente  $i$ . En el caso más simple de un campo magnético inducido por una corriente eléctrica en un conductor rectilíneo infinito, la magnitud de  $H$  está dada por una descripción matemática siguiente, la cual es el resultado de la aplicación de la “Ley de Ampere”:

$$H = \frac{i}{2\pi r} \dots\dots\dots(1.1)$$

Donde  $r$  es la longitud del vector  $\vec{r}$ . Y por tanto, las unidades de  $H$  son: A/m

## 1.2 Momento magnético

El momento magnético de un imán es una cantidad que determina la fuerza que dicho imán ejerce sobre corrientes eléctricas y la tendencia de dicha fuerza a rotar alrededor de un eje provocada por el campo magnético. El momento magnético se genera por una corriente  $i$  y depende del área de la espira formada por la corriente (entre mayor sea la espira, mayor será el momento). (Figura 1). Por lo tanto la magnitud del momento puede cuantificarse a través de la siguiente expresión  $m = i\pi r^2$ . Sus unidades son  $\text{Am}^2$ . Una corriente eléctrica en un alambre en forma de espira, un imán (como los minerales magnéticos), un electrón, una molécula y un planeta como la Tierra poseen momentos magnéticos.

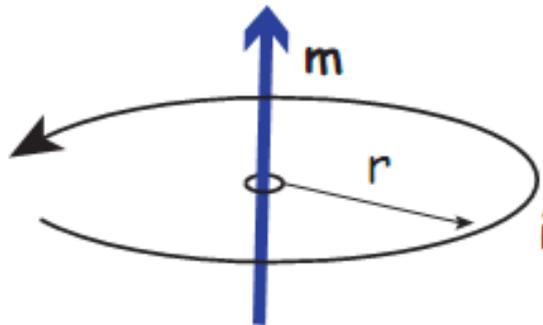


Figura 1. El momento magnético producido por una espira con corriente  $i$  y un radio  $r$ . (Tomado de Tauxe, 2010)

## 1.3 Flujo magnético

La interacción magnética se describe en términos de campo vectorial, donde a cada punto de espacio (y de tiempo) está asociado un vector que determina los cambios que experimenta una carga en un punto dado. Las líneas de campo son una ayuda para visualizar un campo electrostático, magnético o cualquier otro campo vectorial. Cada línea está dibujada de forma que el campo es tangente a la misma en cada punto de esta y las puntas de las flechas indican la dirección del campo. El flujo magnético a través de alguna superficie, en esta

forma simplificada, es proporcional al número de líneas de campo que pasan a través de una superficie. No importa cuan pequeño sea el volumen, las corrientes eléctricas son fuente de campos magnéticos y las líneas de dicho campo son cerradas, de modo que hay tantas líneas de campo magnético entrando (al polo sur,  $S$ ) como saliendo (del polo norte,  $N$ ). (Figura 2)

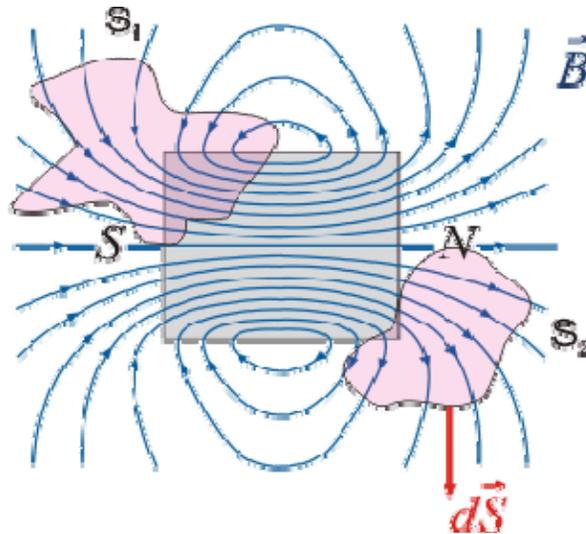


Figura 2. Representación del flujo magnético a través de dos superficies ( $S_1$  y  $S_2$ ) donde  $d\vec{S}$  es un vector perpendicular a la superficie en cada punto. (Tomado de Tauxe, 2010)

#### 1.4 Energía magnética

Un momento magnético  $m$  en presencia de un campo magnético  $B$  tiene una energía magnetostática ( $E_m$ ) asociado a éste. Esta energía tiende a alinear una aguja magnetizada al campo magnético.  $E_m$  está dada por  $-m \cdot B$  o  $-mB \cos \theta$  donde  $m$  y  $B$  son las magnitudes de  $m$  y  $B$  respectivamente,  $\theta$  es el ángulo entre los vectores  $m$  y  $B$ . La energía magnética tiene como unidades a los joules y es mínima cuando  $m$  está alineada con  $B$ . (Figura 3)

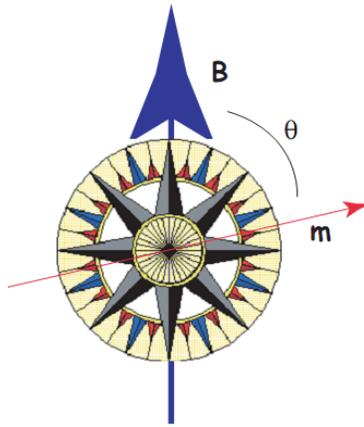


Figura 3. La aguja con momento magnético propio, tiende a alinearse en presencia de un campo magnético, el desplazamiento de la aguja está asociado a la energía magnetostática. (Tomado de Tauxe, 2010)

### 1.5 Magnetización y susceptibilidad magnética

En la teoría clásica del electromagnetismo, la **magnetización** o **polarización magnética** es un campo vectorial que representa la densidad de momentos dipolares magnéticos inducidos o permanentes en un material magnético. El origen de los momentos magnéticos responsables de la magnetización se debe a las corrientes eléctricas resultantes del movimiento de las partículas atómicas como protones y electrones, predominando las interacciones de spin y momento orbital de los electrones. La magnetización  $M$  es un momento normalizado ( $A/m^2$ ). Se puede utilizar el símbolo  $\mathbf{M}$  para la normalización de un volumen (unidades de  $A/m$ ) u  $\Omega$  para la normalización de una masa (unidades de  $A \cdot kg / m^2$ ).

La magnetización neta es el resultado de la respuesta de un material a un campo magnético externo, junto con cualquier momento dipolar magnético des balanceado que pudiera ser inherente al material mismo, por ejemplo, en los ferromagnetos.

Las partículas atómicas responden a campos magnéticos externos y dan lugar a un fenómeno conocido como

magnetización inducida. La relación entre la magnetización inducida en un material  $M_I$  y el campo externo  $H$  se define como:

$$M_I = \chi_b H \dots\dots\dots(1.2)$$

El parámetro  $\chi_b$  es conocido como la susceptibilidad magnética neta del material y se representa por medio de una función compleja dependiente de orientación, temperatura, estado de excitación, escala temporal de observación y campo aplicado, pero casi siempre es representado por un escalar. Debido a que  $M$  y  $H$  tienen las mismas unidades,  $\chi_b$  es adimensional. En la práctica, la respuesta magnética de una sustancia a un campo aplicado puede normalizarse por volumen o por masa o no normalizarse. Se utiliza el símbolo  $\kappa$  cuando se normaliza por unidad de masa y  $K$  para medidas normalizadas por unidad de volumen.

Ciertos materiales pueden producir campos magnéticos en ausencia de campos magnéticos externos (es decir, son imanes permanentes). Estos también son llamados momentos magnéticos “espontáneos” y son el resultado de los giros o “spines” de electrones que, en algunos cristales, actúan en un diseño coordinado y, de esta manera, producen una magnetización neta. La magnetización espontánea resultante puede fijarse a través de varios mecanismos y puede preservarse el registro de antiguos campos magnéticos. Esta magnetización remanente forma la base del paleomagnetismo.

### 1.6 Relación entre $\mathbf{B}$ y $\mathbf{H}$

El término **campo magnético** o **intensidad del campo magnético** se aplica a dos magnitudes:

La excitación magnética o **campo  $\mathbf{H}$**  se representa con  $\mathbf{H}$  y la inducción magnética o **campo  $\mathbf{B}$** , que realmente se considera el campo magnético y se representa con  $\mathbf{B}$ .

Desde un punto de vista físico, ambos son equivalentes en el vacío, salvo en una constante de proporcionalidad

que depende del sistema de unidades.

En paleomagnetismo tanto B como H se refieren al “campo magnético”. La relación entre B y H está dada por:

$$B = \mu (H + M) \dots\dots\dots(1.3)$$

Donde  $\mu$  es una constante física conocida como la permeabilidad. En el vacío, es la permeabilidad del espacio libre,  $\mu_0$ . En el Sistema Internacional de medidas,  $\mu$  tiene dimensiones de henries entre metro y  $\mu_0$  es  $4\pi \times 10^{-7} H \cdot m^{-1}$ . En la mayoría de los casos con interés paleomagnético, nosotros estamos fuera del cuerpo magnetizado así que  $M = 0$  y  $B = \mu_0 H$ . (Tauxe, 2010)

### 1.7 Potencial magnético

Una carga eléctrica aislada produce un campo eléctrico que comienza en la fuente (la carga) y se extiende (diverge) hacia fuera. Ya que no existe flujo de retorno hacia un “depósito” de carga opuesta, se produce un flujo neto hacia fuera de la caja punteada de la Figura 4a. La divergencia del campo eléctrico está definida como  $\nabla \cdot E$  lo que cuantifica el flujo neto. En el caso del campo alrededor de la carga eléctrica, la divergencia es diferente de 0.

Los campos magnéticos son diferentes de los campos eléctricos en que no existe en magnetismo un equivalente a carga eléctrica aislada; sólo existen pares de “cargas opuestas”, es decir, dipolos magnéticos. Por lo tanto, cualquier línea de flujo comienza en un polo magnético y retorna a su polo hermano. (Figura 4b). Es decir, el campo magnético no diverge, es decir,  $\nabla \cdot B = 0$ . Pero si circula, es decir,  $\nabla \times B \neq 0$ , generando líneas de campo en el espacio que se cierran sobre si mismas.

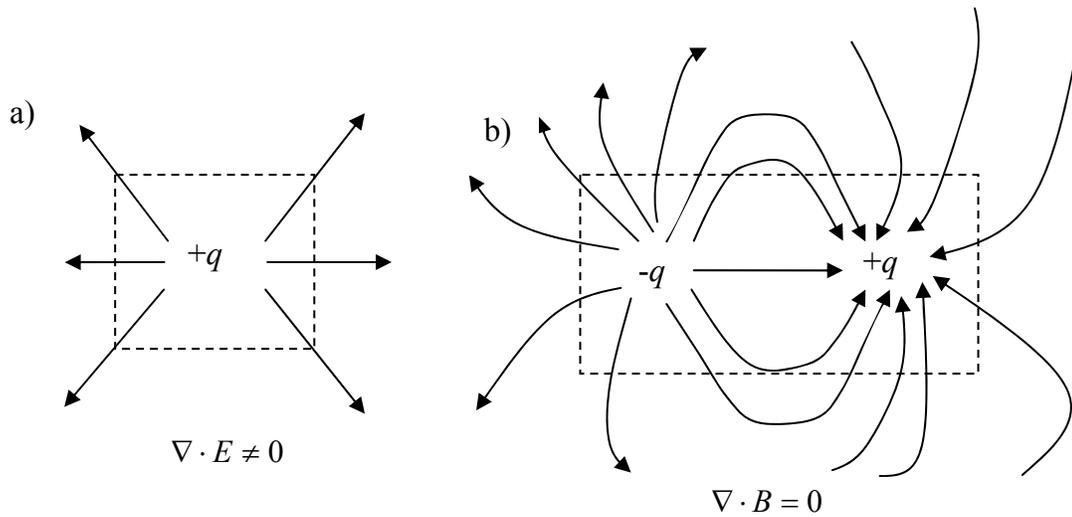


Figura 4.a) Una carga eléctrica produce un campo que diverge hacia fuera de la fuente. Existe un flujo neto fuera de la caja punteada, cuantificada por la divergencia ( $\nabla \cdot E$ ). b) No existen cargas magnéticas aisladas, sólo dipolos. En cualquier espacio cualquier flujo lineal que sale debe regresar. La divergencia de este campo es cero. (Tomado de Tauxe, 2010)

# Capítulo 2. Geomagnetismo

---

El geomagnetismo es la disciplina de la geofísica que se dedica al estudio del campo magnético terrestre y algunos de sus principales objetivos son describir y analizar la variación en el tiempo (secular) y su origen.

El campo magnético puede describirse en cualquier punto de la superficie terrestre por medio de un vector que indica tanto la dirección como la intensidad del campo (Figura 5). Este vector puede describirse enteramente a través de tres elementos vectoriales asociados al campo magnético terrestre: declinación, inclinación e intensidad del campo. La **declinación ( $D$ )** es el ángulo entre el norte geográfico y la componente horizontal del vector del campo magnético. La **inclinación ( $I$ )** es la pendiente del campo vectorial total con respecto a la horizontal. Una inclinación de valor positivo indica una pendiente por debajo de la horizontal. La **intensidad ( $F$ )** del campo es la magnitud del campo vectorial total. La intensidad del campo geomagnético típico en latitudes medias es de  $50 \mu\text{T}$  que puede compararse con el campo encontrado cerca de un pequeño imán cerámico de aproximadamente  $2000\mu\text{T}$ . (Eighmy et al, 1990)

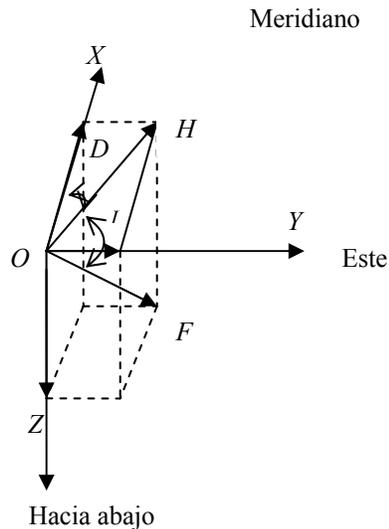


Figura 5. Los elementos vectoriales utilizados para describir la magnitud y la dirección del campo magnético en cualquier punto de la superficie terrestre.  $D$ , declinación (grados);  $I$ , inclinación (grados);  $F$ , intensidad del campo total (T o teslas);  $H$ , componente horizontal de la intensidad del campo ( $T$ );  $X, Y, Z$  (componentes norte, este y vertical hacia abajo) positiva de la intensidad del campo, ( $T$ ). creo se modifico la figura

El sistema de referencia que se elige para la descripción del campo magnético se forma a partir de los patrones que tienen estos elementos sobre la superficie terrestre.

Los mapas de curvas de nivel construidos con los valores de inclinación, declinación magnética e intensidad del campo indican la proporción del campo que puede atribuirse al campo dipolar, que tiene la forma característica del campo magnético que se forma en una barra magnética. El campo dipolar está descrito en su totalidad por la orientación del eje y la intensidad del momento dipolar. Si el eje dipolar coincidiera con el eje de rotación de la Tierra (dipolo axial), las curvas de nivel para la inclinación y las de la intensidad del campo total serían líneas paralelas a la latitud y la declinación sería igual a  $0^\circ$  en todas partes. La inclinación podría variar desde  $-90^\circ$  (vertical y externo) en el polo sur geográfico hasta  $0^\circ$  (horizontal) en el ecuador y de  $+90^\circ$  (vertical e interno) en el polo norte geográfico. La intensidad del campo podría ser el doble de intensidad en los polos que en el ecuador. La desviación del campo real con respecto a el patrón observado es debido, en parte, al hecho de que la

mejor aproximación dipolar está inclinada  $11.5^\circ$  con respecto al eje de rotación, partiendo a la superficie terrestre en las coordenadas  $79^\circ\text{N}$ ,  $109^\circ\text{W}$  (en las Islas Queen Elizabeth en Canadá) en el hemisferio norte. El momento dipolar actual es  $7.9 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ .

El patrón del dipolo magnético está aún más perturbado por una componente no-dipolar del campo geomagnético. El campo no-dipolar causa perturbaciones regionales en el campo dipolar. Sin embargo, se observan tanto el patrón dipolar global en el campo geomagnético como una variación regional no-dipolar. Estos patrones pueden ser descritos en gran detalle actualmente utilizando medidas tomadas por observatorios magnéticos (aproximadamente 200 alrededor del mundo) y por satélites.

Las diferencias entre los vectores magnéticos de dos sitios geográficos distintos se deben tanto al campo dipolar como al campo no-dipolar. El cambio en el campo dipolar entre dos sitios puede corregirse calculando polos geomagnéticos virtuales citados en esta tesis por sus siglas en inglés (VGP's), o transformando las direcciones a un sitio común a través de sus VGP's. Esto es sólo una transformación matemática que expresa la declinación e inclinación de un sitio dado por medio de coordenadas geográficas del eje dipolar equivalente.

La palabra *virtual* indica que este polo es diferente del eje dipolar que mejor se ajusta, el cual se determina usando un conjunto de datos globales. Aún después de esta transformación, los VGP's de diferentes sitios difieren debido a la existencia del campo no-dipolar. Esto explica por qué los registros arqueomagnéticos tomados en una región se vuelven menos aplicables mientras más lejos nos encontremos de esa región y por qué es necesario compilar nuevos registros en regiones separadas por distancias en las que el campo no-dipolar exhibe cambios apreciables.

El campo magnético terrestre presenta variaciones tanto temporales como espaciales. Al cambio temporal del campo interno, con escalas temporales del orden de décadas a varios milenios, se le denomina **variación secular**. Tanto la magnitud como la dirección del campo total cambian debido a los cambios en la magnitud y

dirección tanto de la componente dipolar como de la no-dipolar. Como consecuencia existe una señal global de la variación secular pero con diferencias regionales significativas. De nuevo, los patrones actuales de la variación secular se obtienen fácilmente a partir de observaciones directas del campo en localidades distintas. En la Figura 6 se muestra el amplio registro de la variación secular basado en mediciones directas de la dirección del campo. Los datos se remontan al año 1500 aunque las observaciones regulares se comenzaron a hacer desde 1540 en el observatorio de Londres y después en el de Paris. Durante el periodo de 1576 a 1913 cerca de Londres la declinación varió  $36^\circ$  y la inclinación varió  $8^\circ$ .

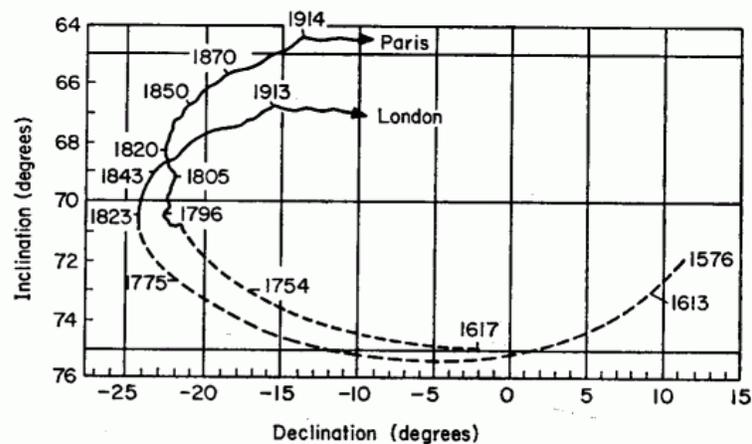


Figura 6. Variación en la declinación y la inclinación en mediciones de los observatorios de Londres y París. Después de Gaiber-Puertas (1953), Observ. Del Elso. Memo. No.11

En el registro histórico aparecen dos modos de variación secular. El primero es la deriva hacia el oeste del campo no-dipolar a una tasa de  $0.2^\circ/\text{año}$ . Esto puede verse en mapas del campo no-dipolar de diferentes épocas como los picos en la deriva del campo no-dipolar que deriva notablemente hacia el oeste con el tiempo. La dirección de la deriva puede inferirse a partir del registro de la variación secular de un solo sitio. Cuando se utilizan las gráficas inclinación vs. declinación para las direcciones, como se observa en la figura 6 para Londres y París, o se grafican los VGP's de los mismos datos, este rizo en sentido de las manecillas del reloj

generalmente indica una deriva hacia el oeste.

El otro patrón de variación secular predominante es el casi 8% de decremento lineal en el momento dipolar durante los últimos 150 años. Si observamos la tendencia en la intensidad del campo magnético en el tiempo podremos observar que es decreciente (Figura 7). También se sabe por estudios arqueomagnéticos en vasijas antiguas de arcilla que el campo magnético terrestre fue aproximadamente el doble de intenso en tiempos del esplendor del Imperio Romano que actualmente. Además, el eje dipolar también presenta una deriva hacia el oeste, y las características del campo no-dipolar han crecido y decaído con el tiempo. Los datos arqueomagnéticos son críticos para determinar cómo estos patrones recientes o modos diferentes de la variación secular son evidentes en el tiempo prehistórico.

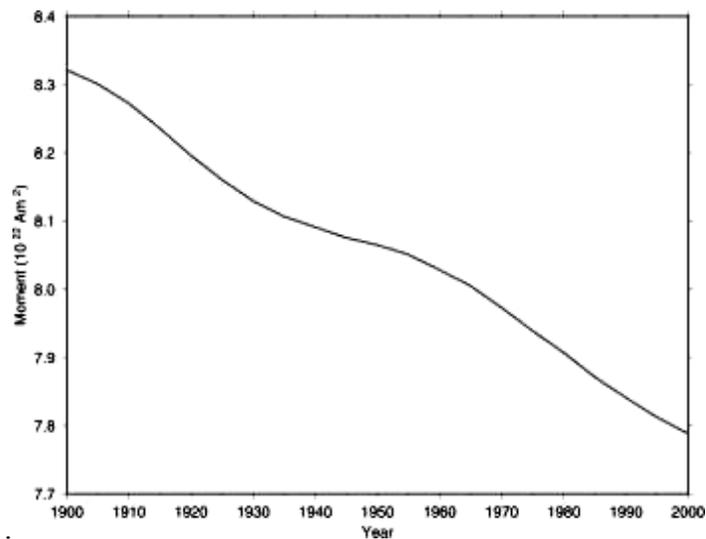


Figura 7. Tendencia de la intensidad del campo magnético terrestre (medida como el momento dipolar) en un periodo de 100 años. De hecho se proyecta que en un periodo de 1500 a 1600 años el momento dipolar terrestre será de cero. (Tomado de British Geological Survey: <http://geomag.bgs.ac.uk/reversals.html>)

## 2.1 Origen del campo magnético terrestre

Como ya se dijo al principio de este capítulo, una de las tareas primordiales de la geofísica ha sido la descripción y medición del campo geomagnético, así como sus variaciones temporales y espaciales. Sin embargo todavía estamos lejos de poder entender y describir su origen. Todas las teorías plausibles suponen la

generación del campo geomagnético dentro del núcleo externo de la Tierra por medio de un dínamo magneto hidrodinámico.

La **teoría del dínamo** busca explicar el mecanismo por el que un cuerpo celeste, como la Tierra, genera un campo magnético. Se cree que el campo geomagnético está causado por el movimiento de convección del hierro y níquel que están fundidos en el interior del núcleo exterior terrestre, así como el efecto Coriolis que es una fuerza producida por el movimiento de rotación de la Tierra.

La interacción entre el campo magnético y la conducción eléctrica del hierro-níquel del núcleo exterior terrestre puede producir una retroalimentación positiva permitiendo que el núcleo de la Tierra opere como una dínamo magnetohidrodinámica auto excitable, es decir, considerar la viscosidad, las conductividades eléctricas, y los movimientos de convección del fluido del núcleo exterior terrestre, permite formular la hipótesis de que dicho fluido puede regenerar el campo magnético que se debilita por la resistividad eléctrica. Existe un balance entre los movimientos del fluido que regeneran el campo magnético y el debilitamiento del campo magnético producido por la resistividad eléctrica. La porción dominante del campo geomagnético detectable en la superficie es esencialmente dipolar con el eje del dipolo casi paralelo al eje de rotación de la Tierra. (Tauxe, 2010).

# Capítulo 3. Magnetismo de las rocas

---

## 3.1 Magnetización inducida y remanente

En el siglo XIX, los científicos pensaron que era posible examinar el registro magnético grabado en las rocas para estudiar el pasado del campo magnético terrestre. Las investigaciones realizadas a mediados del siglo XX dieron la base teórica y experimental para suponer que estos materiales podrían retener el registro de las características pasadas del campo magnético terrestre.

Como se describió en el capítulo introductorio de esta tesis sabemos que los campos magnéticos se generan por corrientes eléctricas. A nivel atómico estas corrientes eléctricas se generan con los movimientos de los electrones. Bajo la teoría de la mecánica cuántica, los movimientos de los electrones se estabilizan gracias al hecho de que cada electrón sólo puede tener ciertas energías de estado de acuerdo a la región o nivel subatómico de energía en la que se mueven. De alguna manera el movimiento de los electrones en cada nivel de energía actúa como un circuito electrónico y genera un momento magnético. Otra fuente de momento magnético a nivel atómico es el giro o *espín* (no pareado) de los electrones. Ambos momentos responden a campos magnéticos externos dando origen a una **magnetización inducida**. (Tauxe, 2009)

Los materiales ferromagnéticos son capaces de retener **magnetización remanente** (permanente) aún después de que el campo magnético que causó su magnetización es removido. De esta forma la magnetización remanente estable actúa como una memoria magnética de los campos magnéticos antiguos de la Tierra, incluso aunque ese campo haya cambiado tanto en dirección como en magnitud. El magnetismo de rocas abarca el estudio de los minerales ferromagnéticos, la física de cómo los granos de estos minerales se magnetizan, y el proceso por medio del cual las rocas (que contienen gran cantidad de granos) adquieren magnetización remanente. Por lo

anterior, es esencial el conocimiento del magnetismo de las rocas para llegar a una adecuada interpretación de los resultados paleomagnéticos. Por ejemplo, los minerales que tienen magnetización remanente y las formas en que adquirieron esta magnetización pueden sugerir los eventos en la historia geológica de la roca que causaron dicha magnetización. Esto puede ser significativo ya que la dirección del campo paleomagnético varía a lo largo de la existencia de la roca, y la dirección registrada depende de la duración de los eventos que ocurrieron durante el registro. Cuestiones similares también son relevantes en los estudios arqueomagnéticos, donde se estudian objetos de arcilla como las cerámicas horneadas y los hornos. (Eighmy et al, 1990)

Según el proceso, la magnetización remanente puede ser de diferentes tipos: una es la **térmica (TRM)**, por sus siglas en inglés) adquirida durante un evento de calentamiento a varios cientos de grados Celsius, y posterior enfriamiento en presencia de un campo magnético. El calentamiento por arriba del punto de Curie de los minerales ferromagnéticos borra completamente toda remanencia y el enfriamiento por debajo del mismo punto en presencia de un campo magnético, permite la adquisición total de la magnetización termoremanente. Por otro lado, el calentamiento por debajo del punto de Curie no borra todas la remanencias previas dando como resultado la adquisición de una magnetización **termoremanente parcial (PTRM)**, por sus siglas en inglés). La TRM en realidad se vuelve estable en un grano particular después de haberse enfriado hasta su temperatura de bloqueo, la cual es menor o igual a la temperatura de Curie, dependiendo del tamaño y la forma del grano. Si el último calentamiento del registro paleomagnético estuvo por arriba del punto de Curie, la magnetización primaria podría representar este evento. Sin embargo, si hubo calentamientos repetidos del objeto a temperaturas por debajo del punto de Curie, la magnetización total puede presentar el efecto de esos calentamientos repetidos.

Cuando un espécimen es llevado al laboratorio, su magnetización remanente **natural (NRM)**, por sus siglas en inglés) es la suma vectorial de la magnetización primaria, presumiblemente una TRM o PTRM, y todas las componentes subsecuentes secundarias adquiridas por cualquier mecanismo. Puede adquirirse una

magnetización remanente **química (CRM)**, por sus siglas en inglés) si ocurre la alteración química de la mineralogía magnética –por ejemplo, por precipitación de cementante de hematita en una roca sedimentaria– debajo de la temperatura Curie, dando como resultado el crecimiento del tamaño de los cristales por arriba de su volumen de bloqueo. La magnetización remanente **detrítica o deposicional (DRM)** es adquirida durante la deposición o litificación de las rocas sedimentarias, cuyos granos minerales se alinean con el campo geomagnético durante estos procesos. Una roca adquiere magnetización remanente **isotérmica (IRM)**, por sus siglas en inglés) si se expone brevemente a campos magnéticos fuertes bajo una misma temperatura ambiente y puede presentarse ocasionalmente en la naturaleza debido a descargas eléctricas de los rayos durante las tormentas. La magnetización remanente **anhisterética (ARM)**, por sus siglas en inglés) es adquirida por la exposición a temperatura ambiente de una roca a campos magnéticos alternos, los granos componentes de la roca que tengan una coercitividad menor al máximo del campo que oscila, oscilarán intentando alinearse con el campo externo, suponiendo que la coercitividad en la roca está en un intervalo, a medida que el campo alternante aumenta, algunos granos se saturarán y no se alinearán totalmente al máximo del campo aplicado, pero la contribución total de éstos será de cero. Casi siempre se adquiere algo de magnetización remanente **viscosa (VRM)**, por sus siglas en inglés) cuando los granos magnetizados menos estables se re-magnetizan y se alinean con el campo magnético actual. Esta magnetización se adquiere gradualmente durante la exposición de una roca a campos magnéticos débiles. (Eighmy et al, 1990; Caballero-Miranda, 2011)

Es posible remover estas componentes secundarias de magnetización por medio de un *lavado magnético* –el cual consiste en someter a una muestra a campos magnéticos alternos crecientes, o a una desmagnetización térmica progresiva, que eliminan las componentes secundarias. Finalmente un estudio del magnetismo de las rocas resulta indispensable para una completa interpretación de cuando y cómo fueron adquiridas las varias componentes de magnetización.

Los minerales magnéticos más importantes en rocas y en estudios arqueológicos son la magnetita y la hematita.

Sus temperaturas de Curie son 580° C y 680° C, respectivamente. De hecho, estos minerales son los últimos miembros de soluciones sólidas de minerales de titanomagnetita y titanohematita. Las titanomagnetitas pueden oxidarse hacia las series de titanohematitas así que la región de los diagramas ternarios Fe-Ti-O que está ligada por estas soluciones sólidas comprende a los minerales ferromagnéticos cuyas propiedades varían en función de su composición. El tamaño de los granos y su forma, así como su mineralogía, pueden tener también un efecto significativo en sus propiedades magnéticas. Además, los granos que llevan remanencia no son necesariamente iguales a los granos que son responsables de las propiedades magnéticas generales de la muestra. La caracterización de la roca en su totalidad se vuelve más complicada y sólo a través de otras técnicas, como la petrografía o difracción de rayos X, es posible dilucidar las propiedades magnéticas de toda la muestra. (Eighmy et al, 1990)

### **3.2 Fábrica y anisotropía**

Con el fin de esclarecer el proceso de magnetización de los minerales contenidos en las rocas que se utilizan en estudios paleomagnéticos y arqueomagnéticos es indispensable, en primer lugar, definir algunos términos como fábrica y anisotropía magnética.

La **fábrica** se refiere al arreglo espacial de los componentes (como minerales, granos, clastos, fragmentos de fósiles o fósiles) que constituyen a una roca, tanto a nivel macro como microscópico. En concreto es la orientación de una dimensión particular de estos elementos. Este arreglo espacial es determinante en el control de las propiedades físicas de las rocas como la conductividad térmica, eléctrica y la susceptibilidad magnética. Dichas propiedades se pueden observar, en mayor o menor magnitud, a lo largo de ciertas direcciones en un mismo material o roca, es decir, son anisotrópicas.

Para que los componentes de una roca puedan adquirir una orientación preferente, se requiere que estos componentes no sean esféricos o equidimensionales para que puedan responder y orientarse conforme a las

fuerzas a las que están sujetos. Una de estas fuerzas es el campo gravitacional que orienta los ejes largos de las partículas paralelos a la superficie en la que se depositan y/o el eje corto perpendicular a esta superficie. El flujo de fluidos newtonianos, como el agua, puede rotar y reorientar las partículas a posiciones más estables, originando un arreglo sistemáticamente inclinado de las partículas conocido como imbricación y, adicionalmente, puede producir además una orientación preferencial de los ejes largos paralela o perpendicularmente al flujo, en función de la velocidad del flujo, tamaño y/o peso específico de las partículas y su grado de alargamiento. A este tipo de fábricas se les conoce como fábricas primarias (Figura 8). En estas fábricas el arreglo característico de la imbricación es que los ejes cortos de las partículas proyectados hacia abajo apuntan en el sentido del flujo.

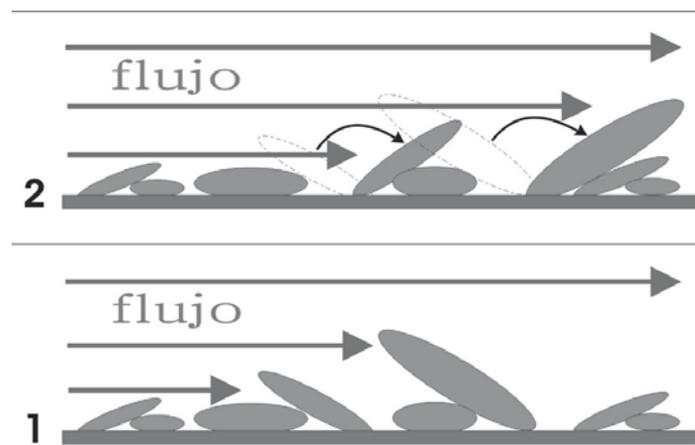


Figura 8. Fábrica primaria: imbricación de clastos en sedimentos. **1.** Depósito de clastos únicamente bajo la acción de la gravedad, **2.** Posición más estable después de la acción de un flujo. (Tomado de Caballero-Miranda, 2011)

Debido a que la orientación de los elementos de la fábrica se debe principalmente a fenómenos relacionados con la formación y deformación de las rocas, es útil para reconstruir la historia geológica de la muestra.

Cuando la orientación de los elementos de la fábrica es producida por esfuerzos externos se denominan fábricas secundarias de deformación en las cuales los elementos rotan, se deforman, se desplazan y/o se trituran y se

tiene el crecimiento de nuevos componentes bajo un campo de esfuerzos. (Caballero-Miranda, 2011)

### 3.3 Magnetización de los materiales

No todos los materiales a nivel atómico se comportan de la misma manera al exponerse a un campo magnético externo. En la mayoría, el momento magnético producido paralelo al campo externo se pierde tan pronto como el campo es retirado –es decir, tienen susceptibilidades bajas- y sólo unos cuantos –aquellos con susceptibilidades mucho más altas- son capaces de conservar una magnetización remanente.

Existen materiales que están constituidos por átomos cuyos *espines* se orientan paralela pero inversamente al campo externo; su magnetización es débil y en sentido opuesto al campo, lo que genera que posean una susceptibilidad negativa y de muy bajos valores. Estos materiales se denominan **diamagnéticos** y son repelidos muy ligeramente ante un campo magnético como el de un imán. Son ejemplos de materiales diamagnéticos: los principales constituyentes minerales de las rocas, como el sílice, el carbonato de calcio, los feldespatos, el carbono y la mayoría de los metales de la tabla periódica.

Existen otros materiales que al exponerse a un campo externo, los *espines* de sus átomos se orientan paralelos y en el mismo sentido que el campo externo, su magnetización es débil y en el mismo sentido del campo, sus susceptibilidad es positiva y un poco mayor que en los materiales diamagnéticos. Estos materiales se denominan **paramagnéticos**, y los podemos encontrar entre los constituyentes de las rocas como silicatos de hierro, carbonatos de hierro y manganeso, tierras raras y arcillas.

Los materiales que conservan magnetización remanente, aún en ausencia de un campo externo, son conocidos en sentido amplio como **ferromagnéticos** y en general son fácilmente identificables porque son atraídos por un imán. En ellos los *espines* de sus electrones se acoplan de forma espontánea, alineándose paralelamente mediante una interacción que permanece aún en ausencia de campo externo; a esta propiedad se le conoce como

magnetización espontánea.

El ferromagnetismo se sobrepone al paramagnetismo de tal forma que ante un calentamiento por encima de una temperatura crítica, los materiales ferromagnéticos se comportan paramagnéticamente. Esta **temperatura crítica** o **temperatura Curie** (o **temperatura Néel** para materiales ferrimagnéticos) es diferente y característica para cada material y sirve para su identificación. Estos calentamientos se producen en diversos procesos geológicos o en condiciones de laboratorio. Entre los materiales ferromagnéticos podemos encontrar hierro, níquel, cobalto, ferritas (compuestas de hierro y boro con bario, estroncio y molibdeno).

En los compuestos más complejos como óxidos de elementos de la primera serie de transición, el *espín* del electrón de los cationes es compartido con la capa de electrones en un anión intermedio por medio de una *fuerza de superintercambio* provocando que la dirección del *espín* del electrón de los cationes vecinos quede invertida, creando fuerzas opuestas de magnetización que están íntimamente mezcladas. Si la intensidad de ambas fuerzas está balanceada, no habrá ninguna magnetización neta resultante. A estos materiales se les denomina **antiferromagnéticos**. Sin embargo en la naturaleza es más frecuente encontrar materiales antiferromagnéticos imperfectos (debido al débil balance de los elementos) como hematinas y goethitas.

Cuando hay una falta de balance entre los componentes y uno resulta mayor que el otro, se tiene una magnetización neta resultante. A estos materiales se les denomina **ferrimagnéticos**. Ejemplos de estos materiales son óxidos de hierro, magnetita, maghemita y pirrotita. (Caballero-Miranda, 2011)

### **3.4 Energía magnética y estabilidad magnética**

Se ha estudiado cuánto tiempo le toma a una partícula quedar establemente magnetizada. Para entender este mecanismo es necesario conocer que la estabilidad magnética tiene que ver con la **energía de anisotropía magnética** debido a que controla la energía requerida para cambiar un momento magnético de un eje fácil a otro. Una forma de lograr este cambio es aplicar un campo magnético suficientemente grande para que su

energía magnética supere la energía de anisotropía. El campo magnético capaz de cambiar la magnetización de una partícula uniformemente magnetizada (a saturación) por arriba de la barrera de energía de anisotropía magnética es llamado coercitividad microscópica.

Entonces, la clave para la adquisición de magnetización remanente es la energía de anisotropía magnética, es decir, de la dependencia de la energía magnética que impone la dirección de magnetización en los cristales. Esto es, la energía de anisotropía magnética controla la probabilidad de cambio de los momentos de las partículas magnetizadas de una dirección fácil a otra. Sin esta energía, los momentos magnéticos de los granos individuales podrían orientarse libremente y no registrarían la dirección del campo desde tiempos remotos.

Imaginemos un bloque de material que contiene un ensamble aleatorio de partículas magnéticas que no están uniformemente magnetizadas y que están dominadas por anisotropía uniaxial. Supongamos también que este bloque tiene una magnetización inicial  $M_0$  y que se le expone a un ambiente libre de campo magnético ambiental. La energía de anisotropía tenderá a llevar cada momento magnético a su dirección original y la magnetización no cambiará con el tiempo. A cierta temperatura, ciertos granos tendrán suficiente energía y cambiarán sus momentos a otro eje fácil. Si el valor de la energía en la superficie se puede aproximar a una esfera, sin hoyos ni protuberancias, no habrá dirección preferente y, con el tiempo, la orientación de los momentos magnéticos serán aleatorios. Por lo tanto, la magnetización como función del tiempo en éste escenario simple decaerá a cero.

La energía de anisotropía controla el **tiempo de relajación** definido como el decaimiento de la magnetización constante en el tiempo en un ensamblaje o arreglo de granos magnetizados cuando se exponen a un campo nulo. La Ecuación 2.1 predice el decaimiento exponencial de la magnetización con el tiempo y el tiempo de relajación  $\tau$ , que es el tiempo que toma el decaimiento de una magnetización inicial a  $1/e$  de su valor inicial.

$$M(t) = M_o \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right), \dots \dots \dots (2.1)$$

El tiempo de relajación refleja la probabilidad de que los momentos magnéticos salten la barrera de energía de anisotropía entre ejes. Por lo tanto, para preservar un registro de campos geomagnéticos antiguos, debe haber un modo para que el tiempo de relajación cambie de corto (tal que la magnetización este en equilibrio con el campo geomagnético ambiental) a largo (tal que la magnetización se “congele”, o se bloquee, por periodos de tiempo geológicos significativos). (Tauxe, 2009)

Una partícula magnetizada con anisotropía uniaxial en ausencia de un campo magnético tenderá a magnetizarse en una o varias direcciones “fáciles” posibles. Consideremos el caso de anisotropía uniaxial, en la cual sólo hay dos direcciones fáciles en cada grano magnetizado. Con el objeto de saltar la barrera de la energía de anisotropía e ir de una dirección fácil a otra, una partícula magnética debe tener energía térmica que exceda a la energía de anisotropía. De acuerdo con la ley de distribución de Boltzmann, la probabilidad de que una partícula dada tenga una energía E es proporcional a  $e^{E/kT}$  donde kT es la energía térmica. Por lo tanto, debe haber un tiempo determinado en el que un grano magnetizado particular tiene suficiente energía térmica de los *espines* electrónicos para superar la barrera de energía y cambiar el sentido de magnetización de un eje fácil a otro.

Si tenemos una colección de partículas magnetizadas con alguna alineación inicial de momentos dándonos una magnetización remanente neta  $M_o$ , la tasa de relajación de los momentos magnéticos de un eje fácil a otro con el tiempo tenderán al caso de no-preferencia y el momento neto decaerá a cero (a pesar de que los momentos de los granos individuales se mantengan en saturación). Esta aproximación al equilibrio de magnetización es la esencia de la Teoría Néel, sintetizada en la ecuación 2.1 y graficada en la Figura 9.

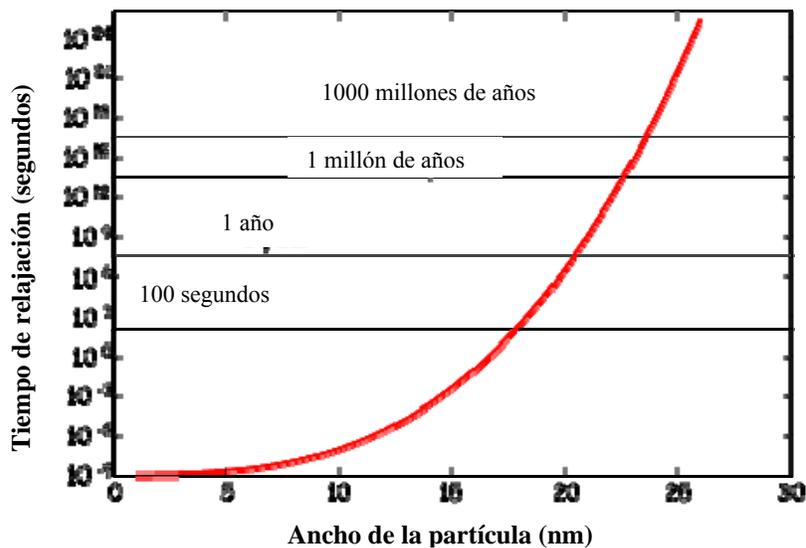


Figura 9. Tiempo de relajación en magnetitas como función del ancho del grano en nanómetros. (Tomado de Tauxe, 2009)

Los tiempos de relajación de granos muy pequeños (0-20 nm, de ancho) son del orden de segundos o minutos, mientras que el tiempo de relajación de partículas de dominio sencillo pueden ser de millones o miles de millones de años. Partículas grandes de dominio pseudo-simple son capaces de retener una magnetización remanente por largos periodos de tiempo (varios miles de años), mientras que las partículas de multi-dominio (ver sección 3.6 para definición de dominios) retienen una memoria del campo aplicado de solamente unas cuantas decenas de años. El tiempo de relajación para una partícula magnetizada es fuertemente dependiente de la temperatura así como del volumen o tamaño de la partícula.

### 3.5 Susceptibilidad magnética

Definimos a la susceptibilidad magnética como la tasa de cambio de la magnetización inducida por medio de un campo magnético inductor o  $\frac{M_I}{H}$ . Debido a que toda la roca o los minerales por separado contribuyen a la susceptibilidad magnética, representa una fuente de información valiosa acerca de la composición de la muestra. Es fácil y rápido medirla tanto en campo como en laboratorio, por lo tanto, la susceptibilidad magnética se aplica en una variedad de formas en el estudio de magnetismo de rocas, incluyendo la correlación

litológica, la fábrica magnética, el dominio magnético/ tamaño del grano magnético, mineralogía, etc.

A nivel atómico, la susceptibilidad magnética resulta de la respuesta de las órbitas electrónicas y/o de los espines no apareados a un campo aplicado. La respuesta diamagnética (órbitas) es extremadamente débil. La respuesta paramagnética, como en la biotita, es más fuerte, pero si existe material ferromagnético en el espécimen, la respuesta será dominada por este último. En minerales altamente magnéticos como la magnetita, la susceptibilidad es dominada por la forma de anisotropía. Para una partícula uniformemente magnetizada (por ejemplo, magnetitas de dominio simple), la susceptibilidad máxima está en el ángulo máximo del eje más fácil, debido a que los momentos ya están a saturación a lo largo de la dirección fácil. Entonces tenemos un resultado paradójico: las partículas magnetizadas uniformemente tienen susceptibilidades máximas a lo largo del eje corto de los granos alargados.

### **3.5.1 Susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura**

La susceptibilidad puede medirse como una función de la temperatura poniendo al espécimen en una espiral térmica, y un campo magnético externo. El diamagnetismo es negativo e independiente de la temperatura (línea punteada en la Figura 10b) y el paramagnetismo es inversamente proporcional a la temperatura (línea sólida en la Figura 10a). Existe una diferencia de un factor de  $\ln(C\tau)$  o aproximadamente 27 entre la susceptibilidad magnética de una partícula superparamagnética y una de dominio simple estable. Esto significa que mientras la temperatura de bloqueo de los granos magnéticos en un espécimen particular se ha alcanzado, la susceptibilidad del grano se incrementa por este factor aunque se alcance la temperatura Curie, punto en el cual sólo se exhibe la susceptibilidad paramagnética y la susceptibilidad cae inversamente con la temperatura (línea sólida en la Figura 10b).

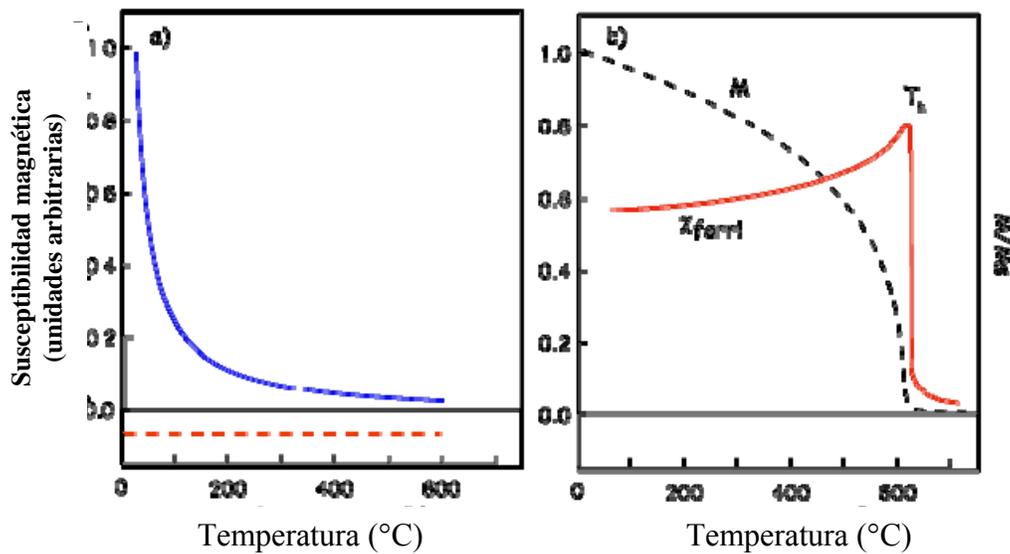


Figura 10. Dibujos esquemáticos de susceptibilidad magnética paramagnética (línea sólida) y diamagnética (línea punteada) como función de la temperatura. b) Comportamiento de susceptibilidad ferromagnética (línea sólida) mientras el material se aproxima a su temperatura de Curie (los datos  $M_s - T$  se muestran como líneas punteadas). (Tomado de Tauxe, 2010)

### 3.6 Anisotropía de susceptibilidad magnética y dominios magnéticos

El estudio de la **anisotropía de la susceptibilidad magnética** de una muestra permite determinar la distribución y la forma, denominada fábrica, de las partículas pequeñas de las rocas de una forma rápida en comparación con mediciones micro o macroscópicas de los elementos de la fábrica.

Gracias a la implementación de instrumentos de medición cada vez más sensibles, al apropiado manejo estadístico de los resultados y a las bases teóricas que explican el origen de la anisotropía magnética, se puede utilizar esta técnica para determinar la fábrica de las rocas a partir de la anisotropía magnética.

El término anisotropía se refiere a la característica de los cuerpos cuyas propiedades físicas dependen de la dirección. En el caso del magnetismo, los cuerpos tienen al menos dos propiedades magnéticas de importancia que varían según la dirección del cuerpo en que se midan, una es la susceptibilidad magnética (anisotropía de susceptibilidad magnética o AMS, por sus siglas en inglés) y la otra es la magnetización remanente (anisotropía

de magnetización remanente o ARM, por sus siglas en inglés) y ambas pueden utilizarse para determinar la orientación de los elementos magnéticos en una roca. Sin embargo dado que cada tipo de anisotropía reside en conjuntos sensiblemente diferentes, pero con intersección de un buen número de elementos, la fábrica magnética determinada con cada anisotropía puede llegar a ser completamente distinta. (Caballero-Miranda, 2011)

Con frecuencia las rocas contienen ensamblajes de minerales ferromagnéticos dispersos en la matriz de minerales diamagnéticos o paramagnéticos. En algunos cristales los *espines* electrónicos trabajan en concierto para crear magnetización espontánea que permanece en ausencia de un campo externo. La base del paleomagnetismo descansa en que esas partículas ferromagnéticas contienen el registro de campos magnéticos antiguos. (Tauxe, 2010)

La evaluación de la anisotropía de remanencia no se efectúa en el estado natural de las rocas ya que la magnetización remanente natural puede tener magnitudes bajas como para poder detectar la anisotropía con precisión y haberse adquirido en condiciones sensiblemente diferentes en un mismo cuerpo de roca. De tal forma que se efectúan experimentos de laboratorio en los que a los especímenes de roca se les expone a lo largo de diferentes direcciones –al menos tres- a campos magnéticos conocidos bajo iguales condiciones de temperatura y así obtener para cada dirección su magnetización remanente respectiva. Generalmente antes de la exposición al campo externo en cada dirección, a los especímenes se les somete a un “lavado magnético” por campos alternos para desmagnetizarlos. Las direcciones y magnitudes de la magnetización remanente obtenidas para cada dirección se manejan matemáticamente con el fin de determinar el elipsoide respectivo de la anisotropía de susceptibilidad magnética (Figura 11a) tanto con sus valores de orientación como de intensidad. La orientación en el espacio de los ejes del elipsoide de la anisotropía de susceptibilidad se efectúa por medio de coordenadas cartesianas (x, y, z) o por coordenadas de declinación y orientación de cada eje. Estas direcciones principales se representan habitualmente en proyecciones ecuatoriales de igual área efectuadas sobre el

hemisferio inferior empleando una simbología convencional: cuadros, triángulos y círculos llenos para representar respectivamente los ejes  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$ . Estas son proyecciones ortográficas, ya que van de la esfera de un hemisferio al plano ecuatorial, al cual llegan mediante líneas ortogonales, lo que tiene el efecto geométrico de conservar las áreas en el plano de proyección ecuatorial (Figura 11b). Comparativamente para el caso de los vectores de magnetización, las proyecciones ecuatoriales empleadas para su representación son de igual ángulo, empleando círculos llenos cuando el vector apunta hacia abajo, esto es, hacia el hemisferio inferior de la esfera y círculos vacíos cuando el vector apunta hacia el hemisferio superior. Estas son proyecciones estereográficas, ya que van de un hemisferio de la esfera al polo del hemisferio opuesto, atravesando con un cierto ángulo el plano ecuatorial de proyección, lo que tiene por efecto conservar los valores angulares en el plano de proyección. (Caballero-Miranda, 2011)

Cada elipsoide graficado corresponde con la medición de la anisotropía de susceptibilidad magnética de un espécimen; debido a que en un mismo sitio se toman varias muestras, compuestas de varios especímenes cada una, se grafican todas ellas y se hace un manejo estadístico direccional para obtener una media representativa como se describe más ampliamente en la sección 3.6.2 de esta tesis.

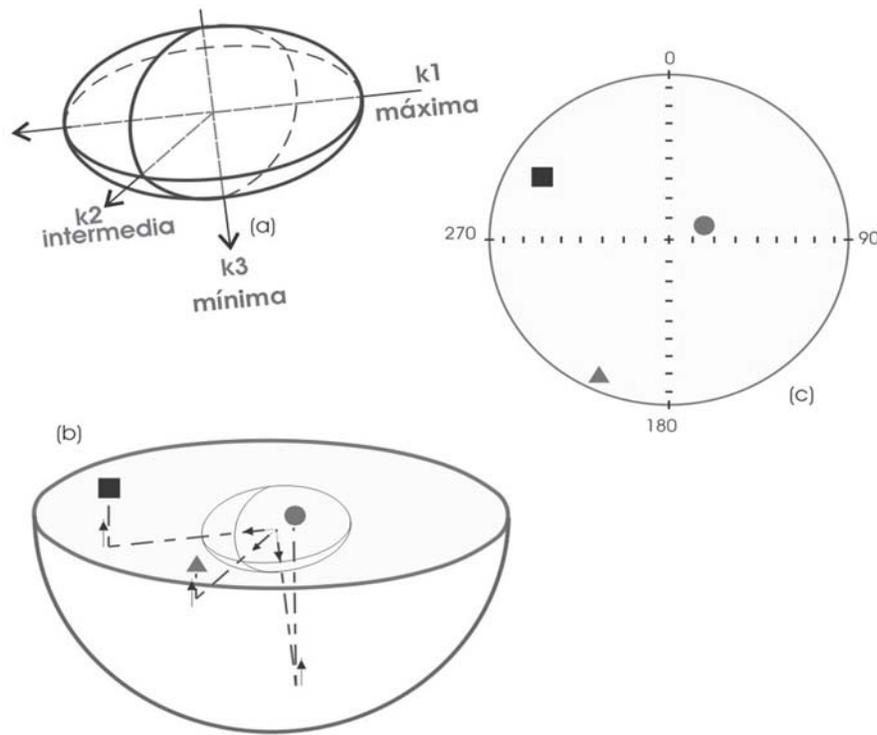


Figura 11. Proyección ecuatorial del elipsoide de anisotropía de susceptibilidad magnética en proyecciones de igual área. (a) Elipsoide de anisotropía de susceptibilidad magnética. (b) Proyección Smith. (c) Proyección Wulff o estéreo diagrams (Tomado de Caballero-Miranda, 2011)

Como se describió ampliamente en la sección anterior, el principio básico de la duración de la magnetización es que las partículas ferromagnéticas tienen varias contribuciones a la energía magnética la cual controla su magnetización. No importa la complejidad que adquiera la combinación de las energías, el grano tratará de adquirir la configuración de magnetización que minimice su energía total, es decir, ciertas direcciones en los cristales magnéticos gastan menos energía que otras. Para adquirir la magnetización de una dirección “fácil” a otra se requiere gastar energía y si este requerimiento energético es muy elevado entonces la partícula permanecerá magnetizada en la misma dirección por periodos de tiempo prolongados –podrían ser miles de millones de años. (Tauxe, 2010)

Los materiales ferromagnéticos obtienen sus magnetizaciones intensas en su mayoría por el momento magnético

derivado del tipo de acoplamiento de los *espines* de sus electrones, microscópicamente esto se exhibe observando que los materiales están constituidos por regiones conocidas como **dominios magnéticos**. Cada dominio es una unidad de volumen en la que todos los dipolos están alineados en una dirección preferencial. (Caballero-Miranda, 2011)

Las regiones magnetizadas permanentes más simples son aquellas casi-uniformemente magnetizadas o con magnetizaciones muy fuertes (como la magnetita). A estas se les conoce como partículas de **dominio simple** (SD, por sus siglas en inglés). Los *espines* de estas partículas actúan en concierto, quedándose tan paralelas como sea posible. De hecho en partículas de magnetita muy pequeñas (<40 nm), los *espines* están esencialmente alineados. Mientras más grandes son las partículas (~80 nm), la energía externa puede minimizarse permitiendo que los *espines* vecinos diverjan un poco del paralelismo estricto debido a que las energías de intercambio y los cristales tienen distintos estados de magnetización; estas partículas son de **dominio pseudo-simple** (PSD, por sus siglas en inglés). En partículas de mayor tamaño (>~200 nm), los *espines* se organizan a sí mismos en regiones de magnetización casi-uniforme (dominios magnéticos múltiples) separados por zonas de dominios de *espín* que cambian abruptamente llamadas paredes de dominio. A estas partículas se les conoce como **multidominio** (MD). Estas estructuras de *espín* más complicadas son muy difíciles de modelar así que la teoría paleomagnética está basada en aproximaciones de dominio simple. En la Figura 12 se ilustran algunos dominios magnéticos. El caso uniforme (dominio simple) se muestra en la Figura 12a. El campo externo es muy grande debido a que los polos están en lados opuestos de la partícula. Cuando la partícula se organiza a sí misma en dos dominios (Figura 12b), el campo externo se reduce aproximadamente en un factor de dos. En el caso de cuatro dominios laminares (Figura 12c), el campo externo es más pequeño. La introducción de dominios cerrados como se muestra en la Figura 12d reduce el campo externo a prácticamente cero. (Tauxe, 2010)

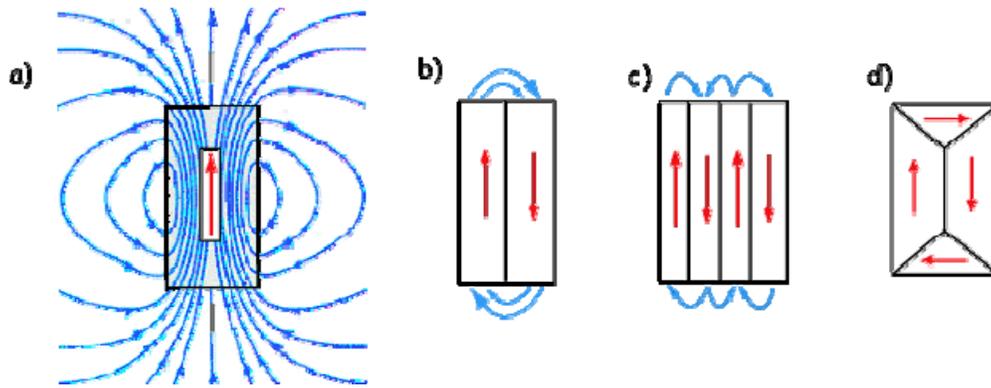


Figura 12. Variedad de estructuras de dominios de una partícula dada. a) Magnetización uniforme (dominio simple). b) Dos dominios, c) cuatro dominios en un patrón laminar, d) esencialmente dos dominios con dos dominios cerrados. (Tomado de Tauxe, 2010)

Derivado del diferente comportamiento que tienen los granos magnéticos de dominio simple (SD) en comparación con los multi-dominio (MD), la presencia de los primeros tiene implicaciones importantes en la anisotropía de susceptibilidad magnética, ya que los ejes de los elipsoides, cuando ésta es medida ante campos externos bajos como los que habitualmente se usan, resultan intercambiados dado que a los materiales de SD no se les induce magnetización hasta con campos muy altos de saturación, dando como resultado arreglos invertidos. (Caballero-Miranda, 2011)

### 3.6.1 Medición de la anisotropía de susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética se obtiene al exponer a una roca o material de masa o volumen conocidos y a temperatura ambiente (ya que la susceptibilidad varía con la temperatura) a un campo externo ( $H$ ). Con ello se le induce al material una magnetización ( $M$ ), cuya magnitud depende de: i) su contenido y proporción de minerales ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos y de ii) la magnitud de los campos empleados para medirla. Si para la producción del campo  $H$  se aplican campos de inducción bajos ( $\ll 1\text{mT}$ ), se asume que hay una linealidad aceptable entre la magnetización y el campo aplicado, pero si se emplean campos mayores ( $> 10\text{mT}$ ), lo común es la no-linealidad. Debido a lo anterior la mayoría de los instrumentos aplican campos bajos.

Sin embargo, en ocasiones se requiere incrementar el campo de inducción para magnificar la señal. En este último caso no deben compararse ambos tipos de susceptibilidad.

La anisotropía de susceptibilidad magnética es habitualmente obtenida mediante campos bajos aplicados en varias direcciones. De la misma forma en que la variación de la susceptibilidad con la orientación se describe matemáticamente en términos de un tensor de segundo orden, en el que se tienen 6 direcciones independientes;

$[(k_{11}), (k_{21} = k_{12}), (k_{22}), (k_{31} = k_{13}), (k_{32} = k_{23}), y (k_{33})]$ , es a lo largo de seis direcciones de forma mínima, en que se deberán efectuar las mediciones. Sin embargo, se emplean más mediciones para minimizar errores. (Caballero-Miranda, 2011)

Las direcciones son normalmente tomadas correspondiendo con las marcas de orientación del espécimen:  $x$  es normalmente el azimut de un núcleo paleomagnético y  $z$  es la dirección perpendicular en el espécimen de su superficie orientada (Figura 13).

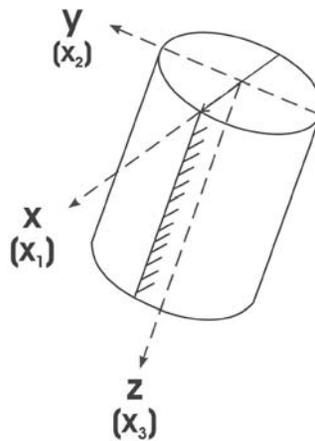


Figura 13. Núcleo paleomagnético con su azimut y sistema de coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  correspondiente. (Tomado de Caballero-Miranda, 2011)

Los instrumentos calculan los ejes principales de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) mediante un *software* específico dando los resultados en coordenadas de la muestra ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  y/o inclinación y declinación)

y proporcionan las magnitudes de la susceptibilidad de los ejes (relativas y/o absolutas). Algunos instrumentos corrigen directamente o mediante algún procesamiento posterior, las direcciones principales de la AMS a coordenadas geográficas con base en los datos de orientación de las muestras y realizan correcciones estructurales basadas en planos de estratificación, flujo de lava u otros. También calculan los parámetros de la AMS conforme a un menú que contiene una serie de parámetros de selección libre. Igualmente el *software* asociado a dichos instrumentos también tiene la posibilidad de efectuar gráficas de direcciones y parámetros así como de procesamiento estadístico de los mismos o bien produce conjuntos de datos para su procesamiento posterior con recursos externos.

### **3.6.2 Análisis estadístico de los datos paleomagnéticos y de la anisotropía de susceptibilidad magnética**

Los métodos estadísticos para analizar los conjuntos de datos de la anisotropía de susceptibilidad magnética son de dos tipos. Uno para el análisis escalar de las direcciones principales de la anisotropía y otro para el análisis de la orientación de los elipsoides. Debido a que en esta tesis se obtuvieron direcciones en el espacio, el método empleado fue la estadística Fisher que es el método estadístico vectorial para el análisis de los resultados paleomagnéticos (vectores de magnetización). Cualquiera de ambos métodos que se elija de acuerdo al conjunto de datos que se obtenga requiere el cálculo de valores medios y factores de confiabilidad. Los análisis estadísticos se efectúan regularmente por sitio o según sea el caso por conjunto de sitios relacionados. A veces, en caso de susceptibilidades bajas con el fin de comprobar la precisión de las mediciones pueden realizarse  $n$  número de mediciones para un mismo espécimen. (Caballero-Miranda, 2011)

Los datos de direcciones paleomagnéticas y/o arqueomagnéticas están sujetos a un número de factores que los dispersa. Entre estos factores podemos mencionar:

- i) incertidumbre en las mediciones debido a “ruido” en los instrumentos o errores en la alineación de la muestra,
- ii) incertidumbre en la orientación de la muestra,

- iii) incertidumbre en la orientación de fuente de la muestra,
- iv) variaciones entre muestras en el grado de remoción de componentes secundarias e
- v) incertidumbre causada por el proceso de magnetización.

Algunas de estas fuentes de dispersión producen una distribución simétrica alrededor de una dirección promedio. Otras fuentes de dispersión contribuyen a que las distribuciones estén más desviadas hacia una dirección que hacia otra.

Con el fin de calcular las direcciones promedio con límites o intervalos de confianza, en paleomagnetismo se utiliza la estadística Fisher (Fisher, 1953), la cual fue desarrollada para evaluar la dispersión de los vectores en una esfera. Se puede aplicar también a datos de dirección que están dispersos de una manera simétrica alrededor de una dirección verdadera (figura 14).

En la mayoría de los estudios paleomagnéticos se asume una distribución Fisher de los datos ya que su tratamiento estadístico permite calcular intervalos de confianza, comparación de direcciones promedio, comparación de dispersiones, etc. La inclinación promedio, calculada como la media aritmética de las inclinaciones, nunca será vertical a menos que todas las inclinaciones sean verticales.

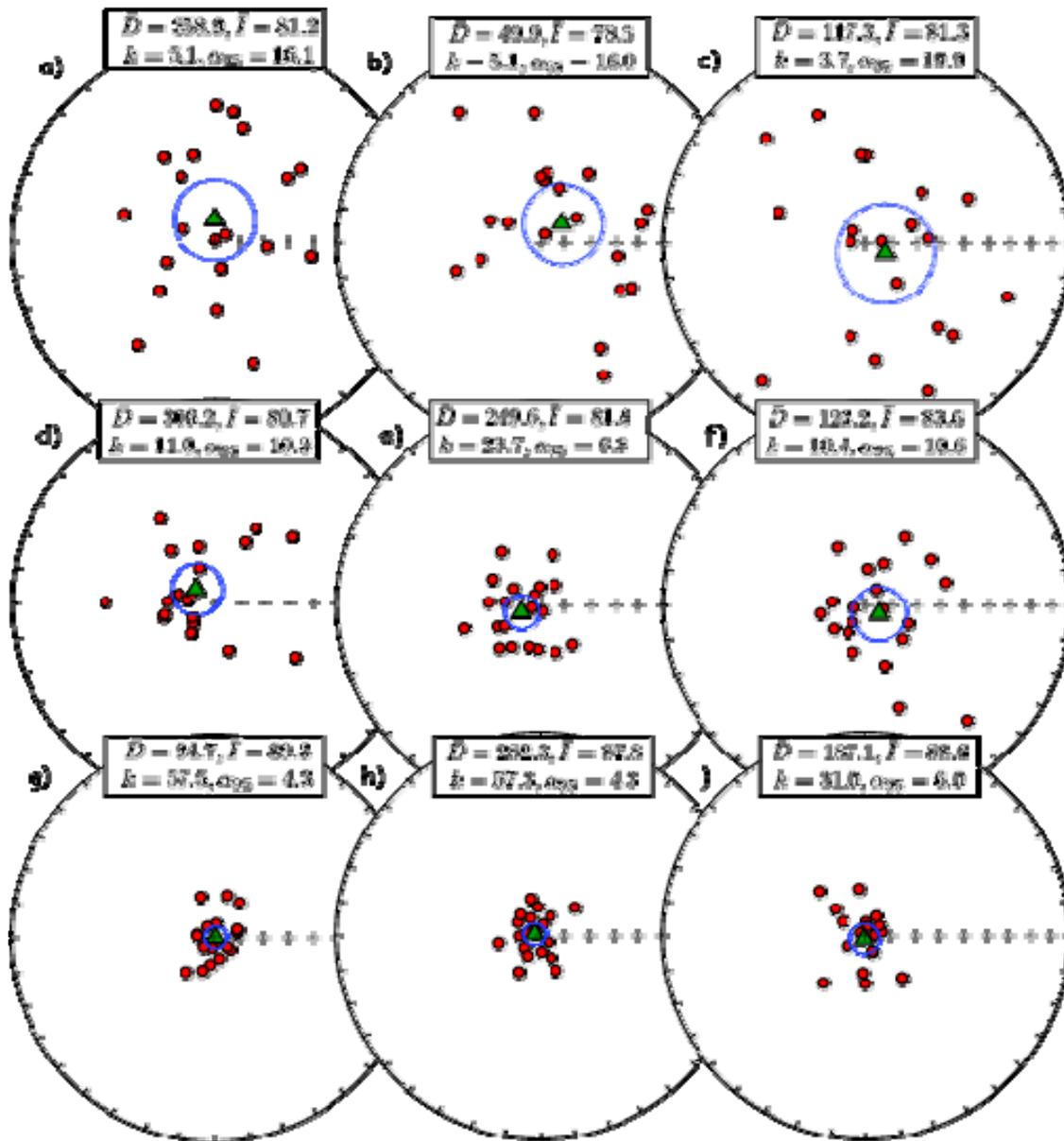


Figura 14. Conjuntos de datos hipotéticos graficados según las distribuciones Fisher con direcciones verticales verdaderas. Estos datos varían en la magnitud de su dispersión de muy dispersos en la hilera superior a muy concentrados en la hilera inferior.  $\bar{D}$  = Declinación promedio,  $\bar{I}$  = inclinación promedio,  $k$  = parámetro de precisión y  $\alpha_{95}$  = parámetro de confianza. (Tomado de Tauxe, 2010)

R.A. Fisher desarrolló una función de densidad de probabilidad aplicable al conjunto de datos de direcciones paleomagnéticas. En la estadística Fisher a cada dirección se le asigna un peso unitario y se representa por

medio de un punto en una esfera de radio unitario. La función de distribución de Fisher  $P_{dA}(\phi)$  calcula la probabilidad por unidad angular de área de encontrar una dirección dentro de un área angular,  $dA$ , centrada en un ángulo  $\phi$  del promedio real. El área angular,  $dA$ , se expresa en estereorradianes, siendo el área total de la esfera de  $4\pi$  estereorradianes. Las direcciones se distribuyen de acuerdo a la función de densidad de probabilidad Fisher, dada por:

$$P_{da}(\theta) = \frac{k}{4\pi \operatorname{senh}k} e^{k \cos \theta} \dots\dots\dots(2.2)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo entre el vector unitario y la dirección promedio y  $k$  es un parámetro de precisión.

Debido a que la intensidad de la magnetización tiene poco que ver con la validación de las mediciones (excepto para magnetizaciones muy intensas), se acostumbra asignar una longitud unitaria a todas las direcciones. La dirección promedio se calcula, primero, convirtiendo las direcciones de los momentos individuales ( $m_i$ ) (ver figura 15), las cuales pueden expresarse como declinación e inclinación ( $D_i, I_i$ ), a coordenadas cartesianas ( $x_1, x_2, x_3$ ). Siguiendo el método de suma de vectores, la longitud de la suma de vectores, o vector magnético resultante  $R$ , está dado por:

$$R = \sqrt{(\sum x_{1i})^2 + (\sum x_{2i})^2 + (\sum x_{3i})^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

La relación entre  $R$  y  $N$ , vectores unitarios individuales, se muestra en la figura 15.  $R$  siempre es menor que  $N$  y se aproxima a  $N$  sólo cuando los vectores están apiñados



Figura 15. Suma de ocho vectores unitarios ( $m_i$ ) para encontrar el vector magnético resultante. (Tomado de Tauxe, 2009)

Habiendo calculado la dirección principal, el siguiente paso es determinar un parámetro estadístico que pueda darnos la medida de la dispersión del conjunto de direcciones que se obtuvieron del conjunto de datos. Una medida de la dispersión del conjunto de direcciones es el parámetro de precisión  $k$ , utilizado en la ecuación 2.2, y calculado por:

$$k = \frac{N - 1}{N - R} \dots\dots\dots (2.4)$$

Donde  $N$  es el número de puntos. Usando este parámetro  $k$ , podemos estimar el círculo de 95% de confianza ( $p = 0.05$ ) alrededor del promedio,  $\alpha_{95}$  que está definido como el límite de confianza de la dirección principal o radio angular a partir de la dirección principal calculada, a través de la siguiente expresión:

$$\alpha_{95} = \cos^{-1} \left[ 1 - \frac{N - R}{R} \right] \left[ \left( \frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right] \dots\dots\dots (2.5)$$

Al elegir el parámetro  $\alpha_{95}$ , con  $(1-p)$  de 0.95, siendo  $p = 0.05$ , obtenemos un círculo de confianza con un 95% de probabilidad de encontrar la dirección verdadera de la distribución dentro de un cono circular de semi ángulo  $\alpha$  alrededor de la dirección resultante  $R$ .

En la literatura clásica de paleomagnetismo,  $\alpha_{95}$  puede calcularse además por medio de la siguiente expresión:

$$\alpha_{95} = \frac{140}{\sqrt{kN}} \dots\dots\dots (2.6)$$

La cual es más confiable para  $k$  mayores a 25. (Tauxe, 2010)

### 3.6.3 Técnicas de desmagnetización

Existen muchas técnicas de laboratorio disponibles para separar las distintas componentes de desmagnetización. En paleomagnetismo se necesita saber la relación entre tiempo de relajación, coercitividad<sup>1</sup> y temperatura con el fin de remover (desmagnetizar) las componentes remanentes poco estables. El principio fundamental que guardan las técnicas de desmagnetización es que entre menor sea el tiempo de relajación  $\tau$ , una partícula obtendrá con mayor facilidad una magnetización secundaria. La base para la **desmagnetización de campos alternos** es que las componentes con tiempos de relajación cortos también tienen coercitividades bajas. La base para la desmagnetización térmica es que estos granos tienen temperaturas de desbloqueo bajas.

En una desmagnetización de campos alternos, se aplica un campo oscilatorio a los especímenes paleomagnéticos en un ambiente de campo magnético nulo. Todos los momentos magnéticos de los granos con coercitividades debajo del valor pico de la desmagnetización de campos alternos siguen al campo. Estos momentos magnéticos que se alinearon con el campo aplicado se quedan así conforme el pico del campo decae gradualmente por debajo de las coercitividades de los granos individuales. Si suponemos que existe una gama de coercitividades en el espécimen, la mitad de los granos con estabilidad baja se quedarán alineados a lo largo de una dirección de la desmagnetización de campos alternos y la otra mitad de los granos con estabilidad baja a

---

<sup>1</sup> La **coercitividad** es la intensidad del campo magnético que se debe aplicar a un material para reducir su magnetización a cero luego de que la muestra ha sido magnetizada hasta saturación. Por lo tanto la coercitividad mide la resistencia de una partícula a ser desmagnetizada.

lo largo de la dirección opuesta; la contribución neta de la remanencia será cero. En el laboratorio, los especímenes se desmagnetizan secuencialmente a lo largo de tres ejes ortogonales.

La **desmagnetización térmica** aprovecha la relación entre tiempo de relajación y temperatura. Existirá una temperatura por abajo de la temperatura de Curie a la cual el tiempo de relajación es de unos cientos de segundos. Cuando se calienta a esta temperatura, los granos con tiempos de relajación así de cortos estarán en equilibrio con el campo. Esto se conoce como temperatura de desbloqueo. Si el campo externo es cero, entonces no habrá magnetización neta. Si se baja la temperatura de la muestra a temperatura ambiente resultará en el incremento exponencial de los tiempos de relajación hasta que esos momentos se vuelvan a cambiar. En esta técnica, la contribución de los granos de estabilidad baja a la NRM puede ser aleatoria. Alternativamente, si se aplica un campo de desmagnetización durante el enfriamiento, los granos que hayan excedido las temperaturas de desbloqueo se alinearán en la nueva dirección del campo; adquiriendo una magnetización termo-remanente parcial.

En la figura 16 se esbozan los principios de la desmagnetización progresiva. Especímenes con dos componentes de magnetización (mostradas como flechas gruesas en el lado derecho), con coercitividades discretas (graficadas como histogramas en el lado izquierdo). Inicialmente la NRM es la suma de dos componentes que tienen dos poblaciones con diferentes coercitividades. Las distribuciones de las coercitividades se muestran en los histogramas de la izquierda en la figura 16. Se muestran dos componentes de la magnetización como líneas gruesas en las gráficas de la derecha. En esos ejemplos, las dos componentes son ortogonales. La suma de las dos componentes al inicio (la NRM o desmagnetización en el paso "0") se muestra como + en la gráfica de vectores de la derecha. Después del primer paso de desmagnetización, la contribución de los granos con baja coercitividad ha sido borrada y el vector de remanencia se mueve a la posición del primer punto lejos de la marca +. Aumentando la desmagnetización en pasos sucesivos gradualmente "opacan" a los vectores de remanencia (representados en líneas punteadas en las gráficas de la derecha) los cuales finalmente se aproximan

al origen.

Existen cuatro conjuntos diferentes de espectros de coercitividad mostrados en la Figura 16, cada uno con un comportamiento distintivo durante la desmagnetización. Si las dos fracciones de coercitividad son completamente distintas, se definen claramente las dos componentes (Figura 16a) por medio de la desmagnetización progresiva. Si existe algún traslape en la distribución de la coercitividad de las componentes el diagrama de desmagnetización resultante es una curva (Figura 16b). Si las dos componentes están totalmente traslapadas, ambas componentes se remueven simultáneamente y puede resultar en un diagrama de aparentemente una sola componente de desmagnetización (figura 16c) También es posible un espectro de coercitividades que incluya otro como se muestra en la figura 16d. Dichos casos resultan en curvas de desmagnetización en forma de “S”. Debido a que puede suceder un traslape total en las rocas “reales”, lo deseable es que se apliquen ambas técnicas de desmagnetización, tanto la campos alternos como la térmica. Si las dos componentes se traslapan completamente en coercitividad, no deberían traslaparse sus distribuciones de temperatura de bloqueo y viceversa. Es común que especímenes de la misma litología tengan distribuciones muy parecidas, así que múltiples especímenes pueden darnos algunas pistas de la posibilidad de las direcciones traslapadas de una muestra dada.

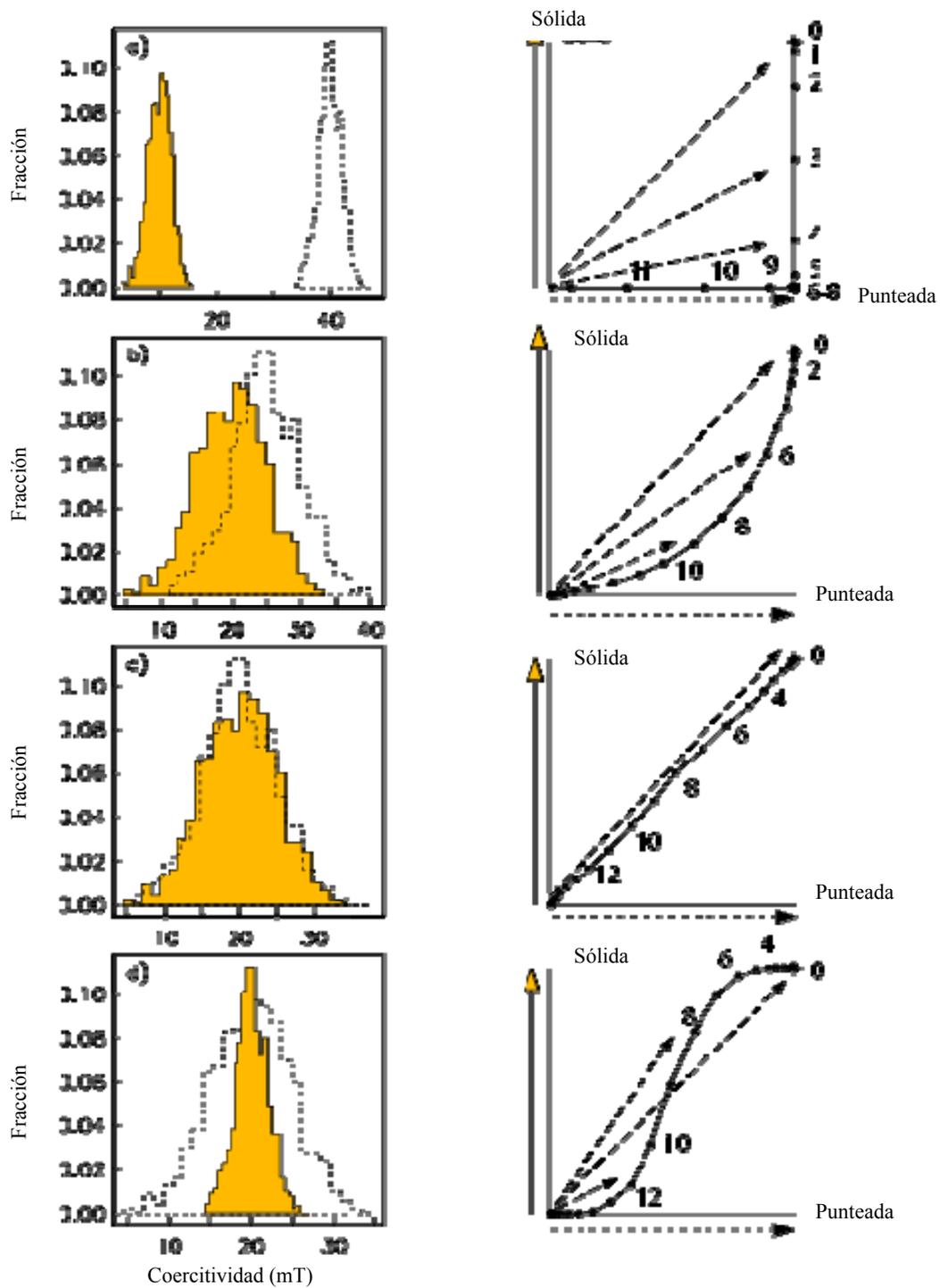


Figura 16. Principio de desmagnetización progresiva. Especímenes con dos componentes de magnetización (mostradas como flechas gruesas en el lado derecho). a) Las dos distribuciones de coercitividad están completamente separadas. b) Las dos distribuciones se traslapan parcialmente resultando en la remoción simultánea de ambas componentes. c) Las dos distribuciones completamente traslapadas. d) Una distribución opaca a la otra. (Tomado de Tauxe, 2010)

### 3.6.4 Cálculo de una dirección paleomagnética

La práctica común en la desmagnetización es medir la NRM (magnetización remanente natural) y después someter al espécimen a una serie de pasos de desmagnetización de intensidad creciente. La magnetización del espécimen se mide después de cada paso. Durante la desmagnetización, el vector de magnetización remanente cambiará hasta que la componente más estable pueda ser aislada, punto en el cual el vector declina en línea recta hasta el origen. Esta componente final es llamada magnetización característica remanente.

Visualizar los datos de desmagnetización en tres dimensiones resulta difícil y, por lo tanto, es un reto graficarlo en papel. En paleomagnetismo se recurre a graficar un conjunto de dos proyecciones de vectores, uno en el plano horizontal y otro en el plano vertical. Estas gráficas son llamadas diagramas de Zijderveld o proyecciones ortogonales.

En las proyecciones ortogonales, el componente  $x_1$  se grafica contra el componente  $x_2$  (símbolos sólidos) en una proyección. La convención paleomagnética difiere de la gráfica x-y común ya que  $x_3$  está en un eje vertical el cual es positivo en la dirección hacia abajo (al revés de lo que marca la convención usual).

Ya que  $x_3$  se grafica contra cualquiera otra característica que se escoja para el eje horizontal, el ángulo de la proyección vertical tendrá la inclinación verdadera si el eje horizontal es paralelo al vector de remanencia, es decir, directamente a lo largo de  $x_1$ . Por esta razón, a veces se grafica  $x_2$  a lo largo del eje horizontal si el vector de remanencia es más paralelo a  $x_2$ . A veces se elige graficar pares de puntos  $(x_1, x_2)$  versus  $(H, x_3)$ , donde H es la proyección horizontal del vector dado por  $\sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ . En esta proyección, a veces llamada “gráfica de componentes”, el sistema de coordenadas cambia con cada paso de desmagnetización ya que H casi siempre cambia de dirección aunque sea levemente. Graficar H versus  $x_3$  resulta entonces en una práctica confusa y que lleva a interpretaciones erróneas.

En la figura 17 se muestran varios tipos generales de comportamientos de desmagnetización. En la figura 17a, el espécimen tiene una NRM con dirección Norte-Noroeste y hacia abajo. La dirección no cambia durante la desmagnetización y la NRM es un solo vector. El campo destructivo medio se ilustra en la figura 17b. El espécimen en la figura 17c muestra un cambio progresivo en la dirección. De una dirección hacia el oeste y hacia arriba, la componente cambia a una dirección hacia el norte y hacia abajo. El vector continuamente cambia de dirección hasta una dirección final pero no “limpia”. Estos datos fueron graficados en un área de proyección igual al plano de mejor ajuste (el círculo mayor). La componente más estable probablemente cae en algún lugar cerca del plano de mejor ajuste.

El comportamiento del espécimen mostrado en la figura 17d muestra una marcada diferencia en la intensidad, después de un decremento suave inicial, empieza a crecer nuevamente mientras mayores son los campos de desmagnetización. La dirección se desvía lejos del origen hacia la dirección que es ortogonal al último eje de desmagnetización.

### **3.6.5 Diagramas de Zijdeveld y círculos de remagnetización.**

Es una de las herramientas más utilizadas para obtener las componentes de la magnetización de una muestra. El diagrama es un gráfico del vector de magnetización durante la limpieza magnética ya sea mediante Campos Alternos o térmicamente, proyectados en dos planos ortogonales. Además que nos da información sobre los cambios tanto en dirección como en intensidad, también de acuerdo a su forma permite la resolución de varias componentes de la magnetización.

El diagrama de Zijdeveld se construye al ir graficando la proyección del punto final del vector de desmagnetización como dos puntos en dos planos ortogonales: el plano horizontal A que contiene al vector  $0a = (X^2 + Y^2)^{1/2}$  y el vertical B  $0b = X(X^2 + Z^2)^{1/2}$  o  $0b = Y(Y^2 + Z^2)^{1/2}$  (Véase figura Fig. 17).

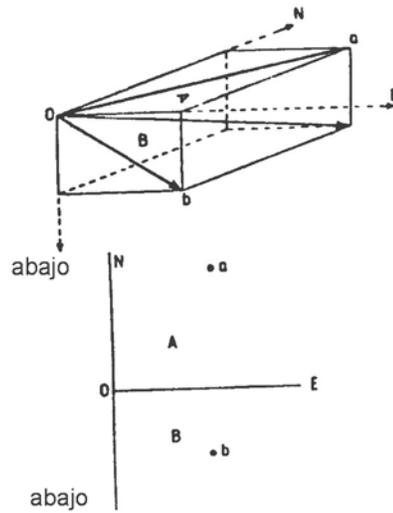


FIG. 17 Componentes del Vector de Magnetización en dos planos ortogonales, A el Norte- Este y B el Este – vertical abajo.  $0a$  componente horizontal.  $0b$  componente vertical. Diagrama de Zijderveld correspondiente

Donde X, Y y Z son las componentes referidas a los ejes coordenados:

$$X = M \cos I \cos D$$

$$Y = M \cos I \sin D$$

$$Z = M \cos I$$

Normalmente X y  $-X$  representan Norte y Sur , Y y  $-Y$  Este y Oeste(W).

La distancia al origen es proporcional a la intensidad. Por lo que en el proceso de desmagnetización se formarán trayectorias sobre los dos planos de acuerdo a los cambios en declinación, inclinación e intensidad.

El caso más simple que es el de remover una magnetización secundaria  $J_s$  sin alteración de la primaria  $J_p$ , o sea cuando los espectros de coercitividad no coincidan (Fig. 18a), la trayectoria serán 2 rectas como se observa, y la

primaria es la que finalmente se dirige al origen. La dirección e intensidades de las componentes primarias y secundarias se pueden obtener de los ángulos que las rectas forman con los ejes del diagrama.

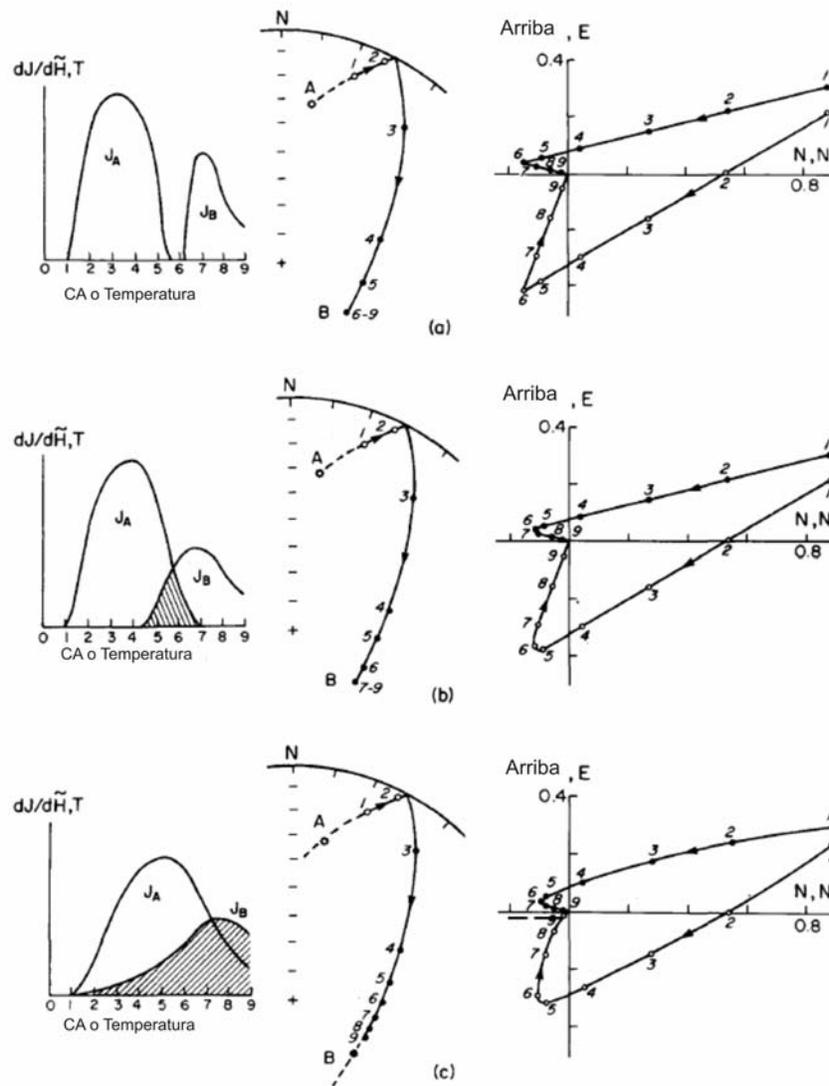


Fig. 18 Ejemplos de Espectros de coercitividad, Proyección estereográfica y Diagrama de Zijderveld del comportamiento de muestras al ser desmagnetizadas mediante Campos Alternos (AF) o Temperatura en el caso de a) Componentes primaria ( $J_p$ ) y secundaria ( $J_s$ ) de la magnetización sin traslape en las coercitividades b) con traslape parcial y c) con traslape total (modificado de Dunlop, 1979)

Este caso es prácticamente ideal, lo más común es que los espectros de coercitividad presenten traslapes (Figura 18 b y c). En el caso de traslape parcial (caso b) es posible determinar las dos componentes, extendiendo las líneas rectas y tomando como referencia su intersección. Las líneas rectas representan una magnetización constante que está siendo removida, y no necesariamente que se esté removiendo una magnetización secundaria.

El problema general de resolver las direcciones de dos magnetizaciones superpuestas se encuentra en varios estados de complejidad. Si un punto final estable es observado, o sea una dirección de remanencia sobre un cierto campo o temperatura, las dos direcciones en principio pueden ser resueltas, lo que también es posible si hay un rango en temperaturas o campos sobre los cuales  $J_p$  es constante (Fig. 19).

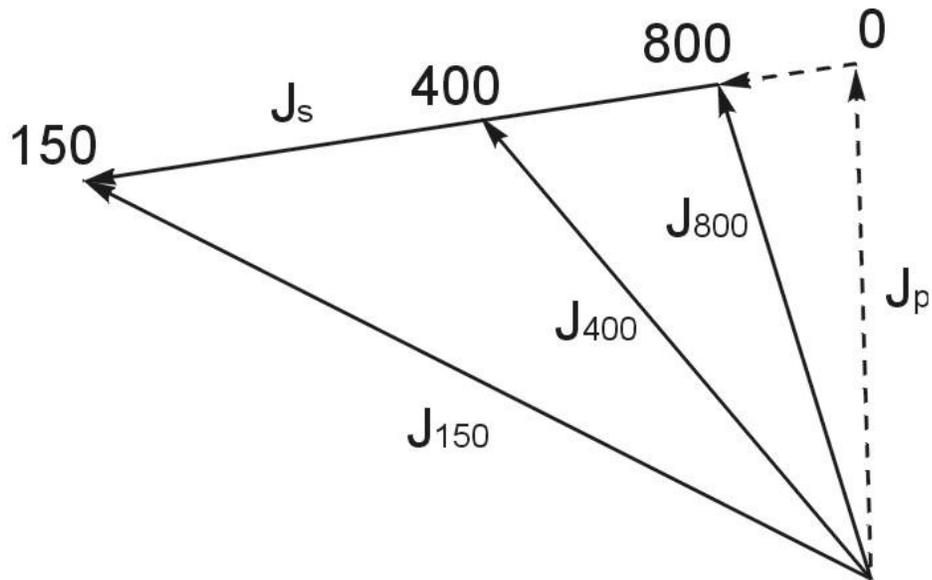


Fig.19 Determinación de la dirección e intensidad de la MRN secundaria cuando la magnetización primaria es constante en un rango de Campo Alternado aplicado.

Aunque normalmente en los estudios arqueo/paleomagnéticos la dirección  $J_p$  es la de principal interés, hay casos en los que es importante documentar la  $J_s$ . En el caso más simple que es el de una magnetización primaria con una secundaria sobrepuesta, el procedimiento anterior falla para establecer la  $J_s$  en gran variedad de circunstancias, por ejemplo si ambos espectros de coercitividad tienen el mismo límite inferior pero  $J_p$  tiene un límite superior mayor, si el nivel de ruido en el magnetómetro se alcanza antes que un punto final estable ha sido alcanzado o si los espectros de coercitividad cubren el mismo rango.

En estos casos es mejor el uso de círculos de remagnetización. Si  $J_p$  y  $J_s$  están siendo desmagnetizadas simultáneamente los vectores resultantes después de cada desmagnetización definen un círculo mayor en la red estereográfica, el círculo de remagnetización. Mientras que las direcciones primarias y secundarias pueden ser definidas en forma única si un punto final estable es encontrado, con rangos de coercitividad apropiados, ellos no están definidos por el círculo de remagnetización, pero deben de encontrarse en algún punto sobre ellos.

Así para una muestra con  $N$  especímenes se tendrán  $N$  círculos de remagnetización, cuyas normales unitarias definirán una resultante que definirá la orientación del círculo de remagnetización de la muestra, cuya dirección media puede ser calculada por mínimos cuadrados y su normal representará la dirección de la magnetización (Halls, 1977).

En el caso de una muestra magnetizada uniformemente que posee dos magnetizaciones una primaria y una secundaria, los círculos de remagnetización obtenidos al desmagnetizar diferentes muestras coincidirán, pero si existe dispersión en alguna de las componentes de la magnetización, los círculos no coincidirán, como en el caso de la Fig. 20a, donde se muestran los círculos de remagnetización de 2 especímenes, pero, tenderán a converger en un punto, en este caso el I (Fig. 20a). Este punto o su anti-polo indica la dirección de una de las magnetizaciones. En la fig.20b se muestran los círculos de varios especímenes, en este caso de 6 especímenes, donde se muestran las intersecciones, círculos A, B y C. En este caso se busca un círculo que es el que cuenta

con el mayor número de intersecciones caso B.

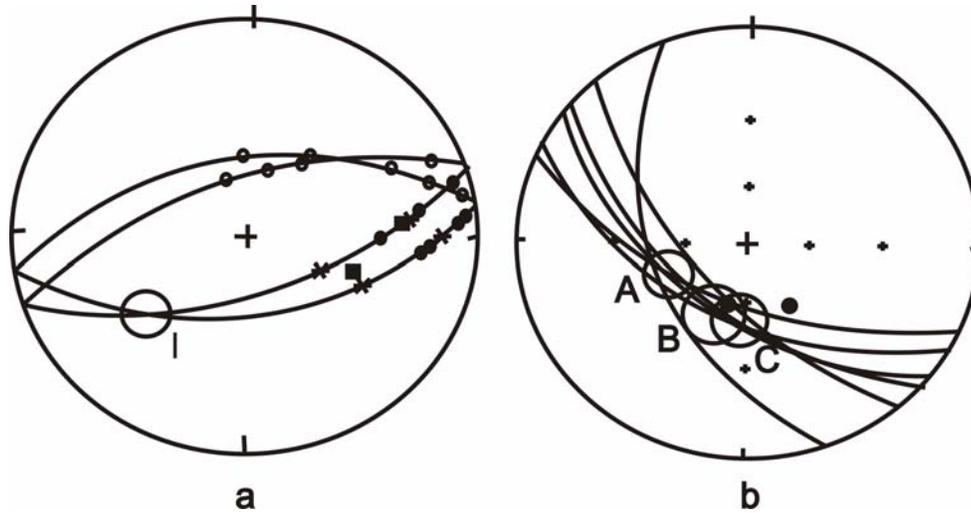


Fig. 20. Convergencia de los círculos de remagnetización

### 3.6.6 Líneas y planos de mejor ajuste

Las proyecciones ortogonales ayudan en la identificación de varias componentes remanentes en el espécimen. Los datos de desmagnetización son comúnmente tratados usando un análisis de componentes principales. Esto se hace calculando la orientación del tensor de un conjunto de datos y encontrando sus *eigenvectores* o vectores principales ( $V_i$ ) y *eigenvalores* o valores característicos ( $\tau_i$ ). Lo que se obtiene de este análisis es una líneas de mejor ajuste por medio de una sola componente de datos como se observa en la figura 21 a) Los símbolos sólidos (vacíos) son proyecciones horizontales (verticales) respectivamente. Están indicados los picos de campos alternantes para cada paso de desmagnetización (en mT). Los símbolos sólidos (vacíos) son proyecciones en el hemisferio inferior (superior) respectivamente y figura 21 b), en donde se muestra la intensidad como función de cada paso de desmagnetización (Datos de a). También se muestra el campo destructivo medio o un plano de mejor ajuste (o gran círculo, si cada punto está dando unidad de peso) por

medio de datos de componentes múltiples como se muestra en la figura 21 c) Espécimen con dos componentes con estabilidades sobrelapadas. El círculo de mejor ajuste se muestra como la curva a través de los datos (el círculo de trazo discontinuo) es la proyección del hemisferio superior). d) Datos de un espécimen que muestra evidencia de magnetización remanente. Durante la desmagnetización, el vector crece perpendicular a la última dirección de desmagnetización. Kirschvink (1980) también define el ángulo de desviación máxima o MAD, por sus siglas en inglés, para cada uno de ellos.

La línea de mejor ajuste está dada por el vector principal  $V_1$  y su MAD está dado por:

$$MAD = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{\tau_2^2 + \tau_3^2}}{\tau_1} \right)$$

Si se puede aislar más de una dirección principal (como en el espécimen de la Figura 21 c-d), el *eigenvector*  $V_3$  asociado con el *eigenvalor*  $\tau_3$  puede tomarse como el polo del plano de mejor ajuste donde mejor se encuentre la componente de interés. El ángulo MAD para el plano de mejor ajuste está dado por:

$$MAD = \tan^{-1} \sqrt{\tau_3 / \tau_2 + \tau_3 / \tau_1}$$

El ángulo entre la línea de mejor ajuste por medio de los datos y el origen se denomina el Ángulo de Desviación o DANG, por sus siglas en inglés. La línea que conecta los datos con el origen se toma como el vector del origen al centro de masa de los datos. (Tauxe, 2010)

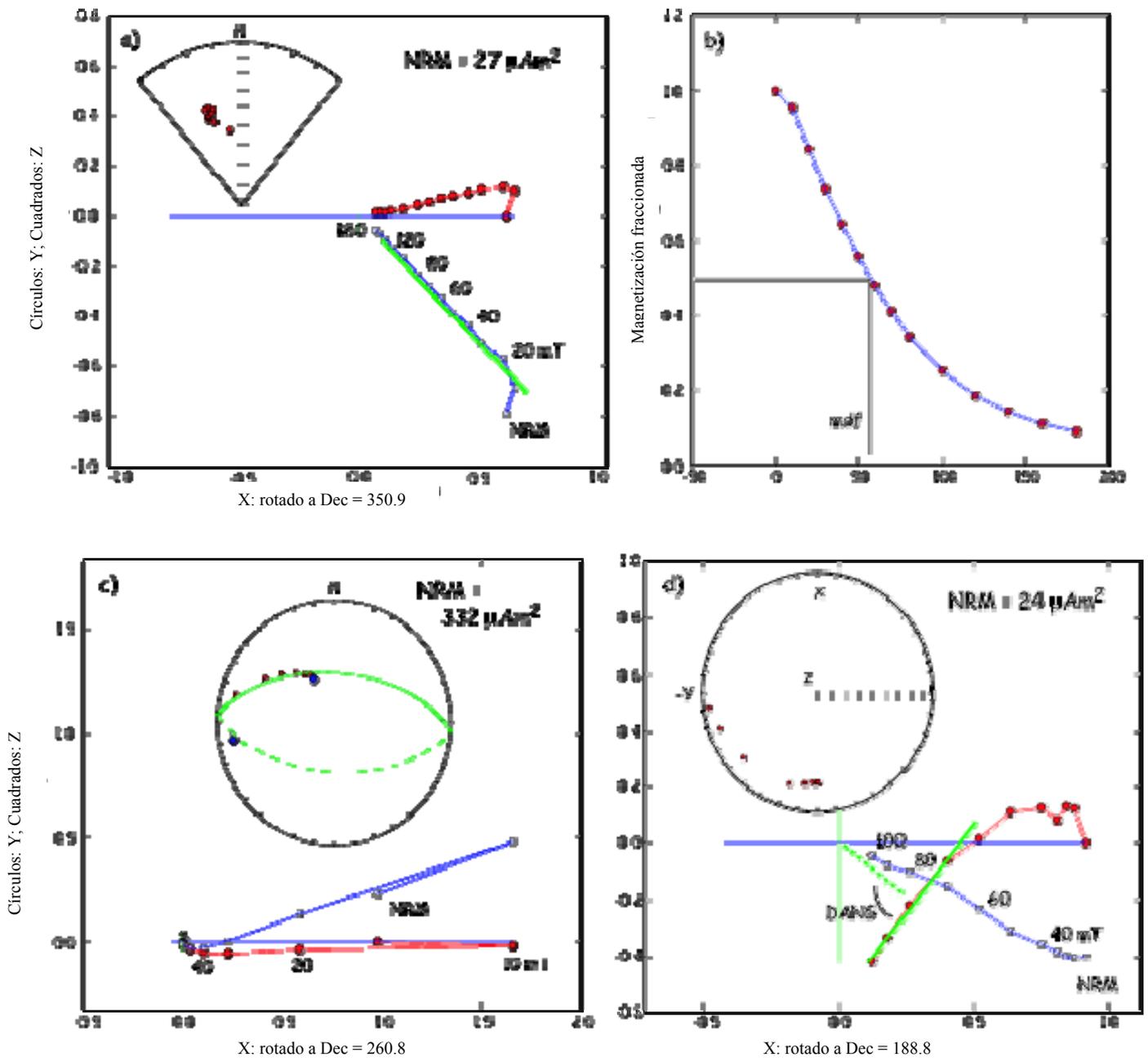


Figura 21. Diferentes tipos de comportamiento en el método de desmagnetización por campos alternos y el análisis matemático de estos. (Tomado de Tauxe, 2010)

### 3.7 Histéresis magnética

En esta sección se desarrollará la teoría para predecir la respuesta de las sustancias a la aplicación de campos externos, en experimentos que generan ciclos de histéresis. Se definirá una serie de parámetros que son útiles en el estudio del arqueomagnetismo y paleomagnetismo.

Comencemos considerando qué sucede con partículas simples cuando se someten a campos magnéticos en un ciclo conocido como ciclo de histéresis. Como se describió anteriormente, sabemos que cuando en un dominio simple las partículas uniaxiales se someten a un campo magnético intenso, las partículas magnetizadas gradualmente adquieren la dirección del campo aplicado. Si no se llega a la condición de cambio (sección 3.4 de esta tesis), entonces la magnetización retorna a la dirección original cuando el campo magnético es removido. Si se llega a la condición de cambio, la magnetización se volverá irreversible y se quedará en la partícula aunque el campo magnético sea removido. (Tauxe, 2010)

Los ciclos de histéresis describen el comportamiento de los materiales al aplicar el campo en un sentido hasta alcanzar la magnetización de saturación ( $M_s$ ) del material (punto 2, figura 22), después, una vez removido el campo hasta donde conserva su magnetización remanente ( $M_r$ , punto 3, figura 22) y el comportamiento a partir de aquí al aplicar nuevamente un campo en sentido inverso hasta lograr una magnetización cero (punto 4, figura 22) y nuevamente la  $M_s$  del material (ahora en sentido inverso, punto 5, figura 22), seguido del retiro del campo hasta donde el material conserva una magnetización o  $M_r$  (punto 6) y de aquí al inicio de un nuevo ciclo de magnetización con un campo en el sentido inicial. Las gráficas de estos ciclos permiten identificar el tipo de material mediante: a) los valores de la  $M_s$  y el valor del campo aplicado ( $H_s$  en la figura 22) bajo el que se adquiere y b) la amplitud del ciclo o el valor de la coercitividad (valor del campo en el punto 8).

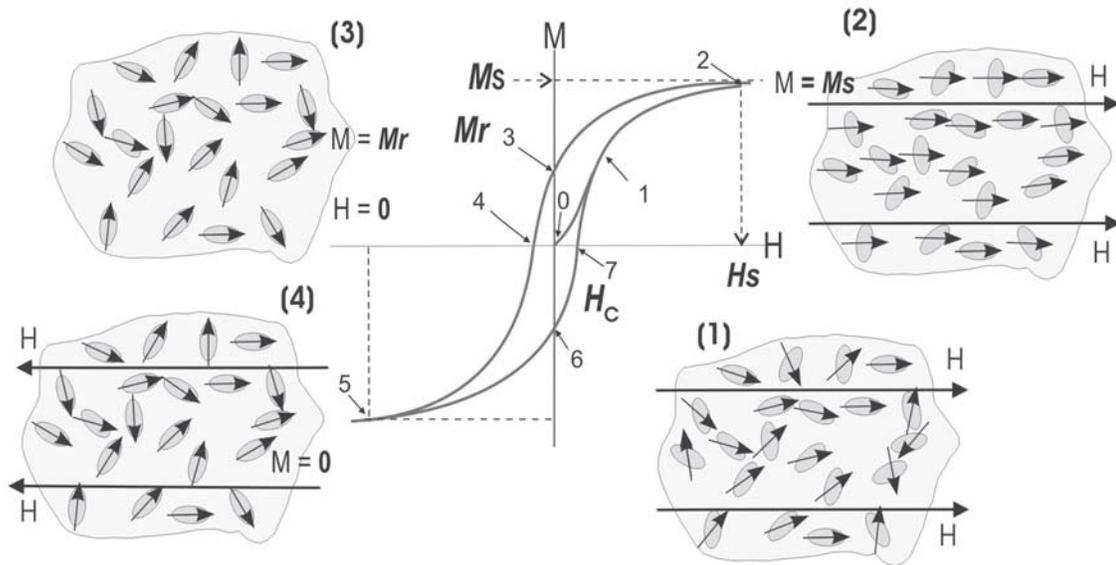


Figura 22. Gráfica del ciclo de histéresis para un material con el 5% en volumen de partículas alargadas de magnetita de dominio sencillo. Los puntos señalados con flechas se explican en el texto. Los dibujos alrededor de la gráfica ilustran el comportamiento de los puntos 1, 2, 3 y 4.  $M$  = magnetización,  $M_s$  = magnetización de saturación,  $H$  = campo magnético de exposición,  $H_s$  = campo de saturación. (Tomado de Caballero-Miranda, 2011)

### 3.7.1 Caracterización del material: Diagrama de Day

Del ciclo de histéresis obtenemos la magnetización ( $H_{cr}$ ) la cual incrementa gradualmente, se mide la magnetización remanente o  $M_r$  hasta llegar al punto de saturación  $M_s$ , entonces se identifica la magnitud del campo coercitivo  $H_c$  ( $H_c$ : campo necesario para que  $M=0$ ), para el cual  $M$  ya no cambia en dirección. Así se grafica la razón entre coercitividad de remanencia y el campo coercitivo ( $H_{cr}/H_c$ ) contra la razón entre magnetización remanente y punto de saturación ( $M_r/M_s$ ). Este diagrama con límites para magnetita, identifica el tipo de dominio magnético presente en el espécimen. Como se observa en la figura 23. La región superior izquierda corresponde a dominio sencillo SD, la región media es el pseudo dominio sencillo PDS y la región inferior derecha para dominio múltiple MD.

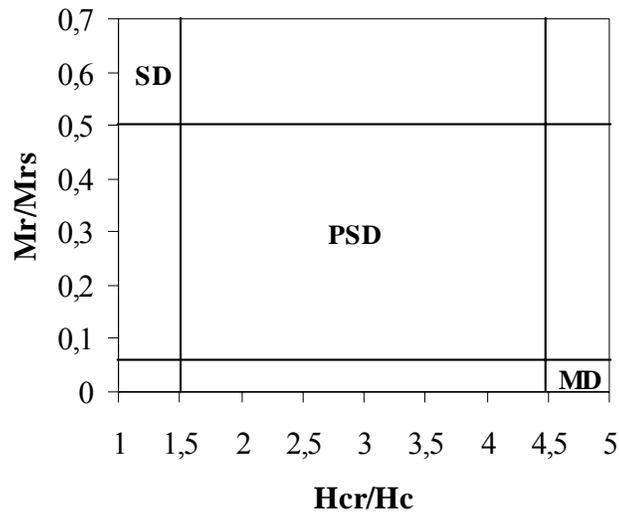


Figura 23. Diagrama de Day. Donde **SD** es dominio simple, **PSD** pseudodominio simple, y **MD** dominio múltiple.

### 3.8 Medición de la magnetización remanente

Para medir la magnetización remanente de especímenes paleomagnéticos se utiliza un magnetómetro. El más común es el magnetómetro de giro llamado así debido a que hace girar al espécimen para crear una fuerza electromotriz fluctuante o emf. Esta energía es proporcional a la magnetización y puede determinarse relativamente a los tres ejes definidos por el sistema de coordenadas de la muestra. La magnetización a lo largo de un eje dado se mide detectando los voltajes inducidos por el momento magnético de giro en un conjunto de espirales ascendentes. Los magnetómetros se utilizan para medir las tres componentes de la magnetización necesarias para definir un vector ( $x_1, x_2, x_3$  o su equivalente,  $x, y, z$ ).

Los datos deben transformarse del sistema de coordenadas del espécimen a, por ejemplo, coordenadas geográficas. Esto puede hacerse por medio de una manipulación matricial.

En el caso de los ciclos de histéresis, casi siempre se grafican usando el campo de inducción  $B$ , medido en teslas, que es el que se aplica con los instrumentos de laboratorio y con el valor de la magnetización

normalizada con el fin de comparar mejor el comportamiento magnético entre los diferentes materiales como se observa en la figura 24, donde se ilustra el comportamiento de materiales a) diamagnéticos, b) paramagnéticos y c) superparamagnéticos d) antiferromagnéticos imperfectos, e) ferrimagnéticos (de dominio simple) y de f) dominio pseudo-simple (PSD) respectivamente.

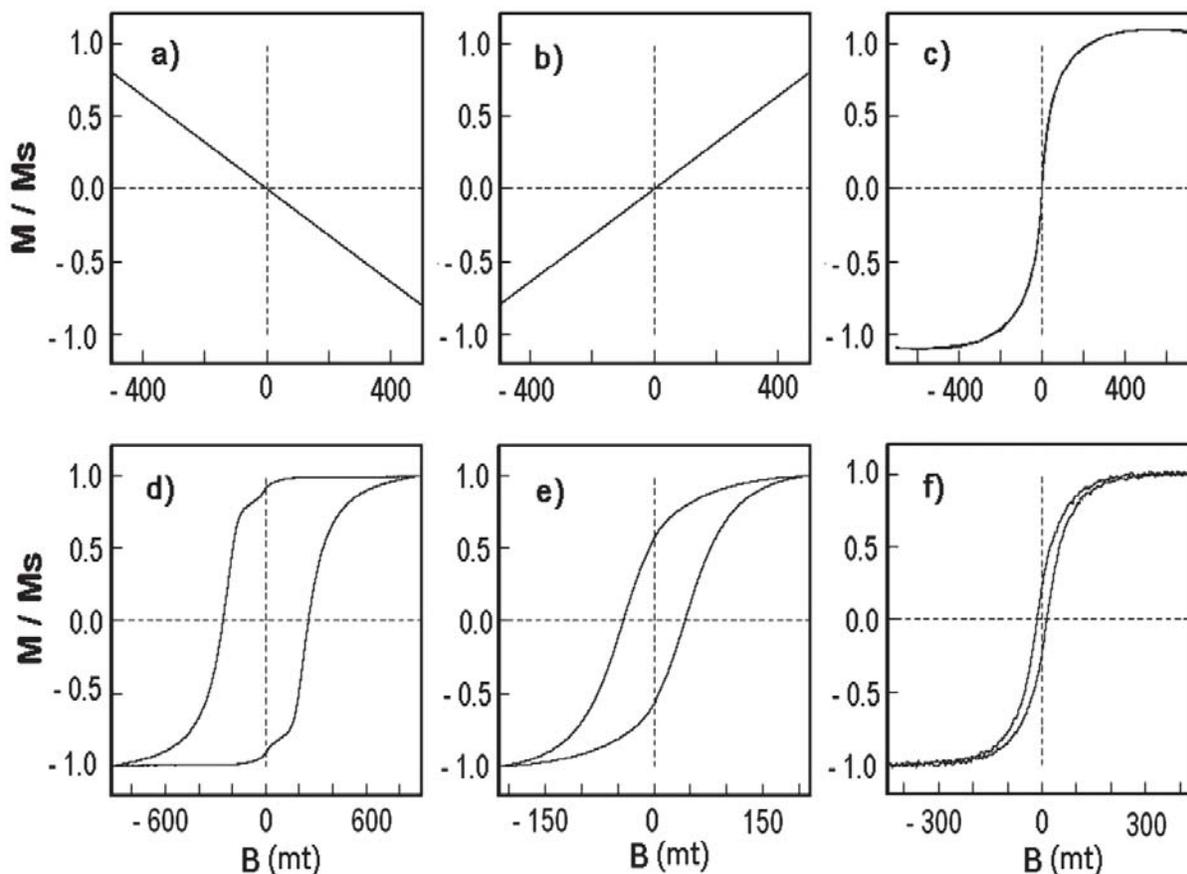


Figura 24. Ciclos de histéresis que ilustran el comportamiento de materiales (a) diamagnético, (b) paramagnético, (c) superparamagnético, (d) antiferromagnético imperfecto, (e) ferrimagnético (dominio simple), (f) dominio pseudo-simple. (Tomado de Caballero-Miranda, 2009)

# Capítulo 4. Arqueomagnetismo

---

El arqueomagnetismo es el estudio de la magnetización que ha quedado registrada en materiales de interés arqueológico, a partir del cual pueden determinarse las variaciones temporales en el campo magnético de la Tierra o para realizar dataciones. El desarrollo de ésta disciplina ha permitido reconstruir los cambios en la dirección del norte magnético para intervalos de tiempo de interés arqueológico, estudiando la magnetización de las estructuras de arcilla cocida. Cuando la arcilla se cuece a unos  $700^{\circ}\text{C}$  y no se vuelve a calentar, las partículas de hierro que contiene, comportándose como dipolos magnéticos, se alinean en dirección del campo magnético terrestre en el momento de su último calentamiento. Así, se puede elaborar una curva de las variaciones temporales en la dirección magnética, que a su vez puede ser utilizada para datar otras estructuras de arcilla cocida con edad desconocida. Esta curva se denomina curva de referencia. La datación arqueomagnética se ha utilizado para sitios arqueológicos de hasta 50,000 años de antigüedad.

A través del uso de dos componentes principales podemos describir el campo magnético de la Tierra. La componente más intensa, definida por los polos magnéticos terrestres, tiene un comportamiento de dipolo magnético y ha presentado inversiones en su dirección en intervalos irregulares. La componente más débil está relacionada con variaciones locales, no dipolares, del campo magnético terrestre. Ya que el campo magnético terrestre tiene estas dos componentes las curvas de variación secular tienen validez regional, y no mundial. Ambas componentes varían gradualmente en el tiempo y con dichas graduaciones se puede formar un registro o una curva, esta curva se denomina curva de referencia de la variación secular. La brújula no apunta al polo norte geográfico sino en la dirección que está en función del polo norte magnético y la variación local del campo magnético. Declinación e Inclinación magnéticas en cualquier momento pueden quedar registradas en una estructura de arcilla que contenga magnetita, que se caliente por arriba del punto Curie y que se enfríe por

debajo del mismo punto en presencia de un campo magnético. En general, muchas culturas usaron estufas u hornos con fuego prendido continuamente. Estas estructuras estaban hechas de bloques de arcilla que fueron cocidos en el lugar donde fueron usados. Estos objetos de ocupación pueden tener registrada la dirección magnética de la última época en que fueron usados o expuestos al fuego. (Eighmy et al, 1990)

#### **4.1 Datación arqueomagnética: sistema cronométrico**

La datación arqueomagnética es el estudio e interpretación de las señales del campo magnético terrestre de épocas pasadas que quedaron registrados en materiales arqueológicos. Los materiales ferromagnéticos como la magnetita contenida en las muestras adquieren un arreglo cuando se calientan por arriba de su punto Curie, y se enfrían por debajo del mismo punto, “congelando” el momento magnético del material en la dirección del campo magnético local de ese punto en el tiempo. La dirección y la magnitud del campo magnético terrestre en una localidad particular varían con el tiempo, y pueden usarse para constreñir la edad de los materiales. En conjunción con técnicas como la datación radiométrica, la datación arqueomagnética puede usarse para construir y calibrar la escala temporal de la polaridad geomagnética. (Butler, 1992)

Las técnicas de datación absoluta en arqueología se pueden dividir en dos tipos básicos, procesos dependientes de tasas (o relojes) y patrones de coincidencia. En cada tipo existen técnicas de datación que son útiles sólo en escalas regionales.

Para procesos dependientes de tasas o relojes, el decaimiento radiactivo funciona como reloj y como ejemplos de este tipo de dataciones tenemos: datación potasio-argón y radiocarbono, por otro lado las para procesos en los cuales se usan patrones de coincidencia tenemos los efectos del decaimiento radiactivo en las propiedades de una muestra (termoluminiscencia, huellas de fisión), u otros tipos de cambio físico-químico progresivo en la muestra (hidratación de la obsidiana, racemización de aminoácidos). Estos tres tipos de relojes tienden a exhibir, en el orden en que fueron enlistados, una dependencia creciente en las características de la muestra o en

parámetros ambientales. Para las técnicas de decaimiento radiactivo, la tasa de decaimiento es un proceso atómico independiente de las condiciones ambientales, así que este reloj seguirá corriendo a una tasa constante. Para los otros sistemas cronométricos, la tasa puede variar de acuerdo a la localidad, el material y el tiempo. Así que las tasas deben ser evaluadas por separado para cada estudio.

La efectividad de las técnicas de coincidencia de patrones dependen del esfuerzo que se ponga en determinar el patrón de cambio, o registro principal, de la variación del fenómeno que se esté investigando. También se necesita de un método para determinar con qué periodo de tiempo las medidas coinciden con el registro principal. Estas técnicas pueden distinguirse si la naturaleza del patrón es binaria, es decir, si representan una alternancia entre dos estados, o es continua, en donde un parámetro físico exhibe variación continua como función del tiempo. Por ejemplo, la estratigrafía reversa paleomagnética involucra un fenómeno síncrono global: la inversión del campo magnético terrestre. Para compilar el patrón de la inversión de la polaridad se usan datos de todo el mundo. Las rocas que se usan para compilar este registro principal deben datarse por alguna otra técnica. Este registro puede usarse para datar rocas de cualquier área geográfica. El campo magnético tiene además una polaridad normal y una inversa, así que esta es una técnica binaria. En una secuencia ininterrumpida de rocas ocurren muchas inversiones produciendo un patrón estratigráfico de inversiones que pueden relacionarse de manera precisa a patrones temporales de la escala de tiempo de las inversiones.

En la datación arqueomagnética, que es una técnica de coincidencia regional continua, las dataciones se infieren comparando la dirección arqueomagnética registrada por una sola muestra o grupo de muestras con el registro de variación secular regional. De esta forma, el proceso de datación arqueomagnética se puede dividir en dos componentes. El primero es determinar el patrón de la variación secular. El segundo es usar ese registro para interpretar las dataciones arqueomagnéticas relacionando una dirección arqueomagnética particular con este patrón. (Eighmy et al, 1990)

Una curva de variación secular bien construida permite hacer dataciones bastantes precisas en objetos que pertenecen a su misma región geográfica y puede conseguirse buscando la coincidencia de alguno de sus parámetros magnéticos con aquellos previamente establecidos, obteniéndose así una o varias edades posibles. Para elegir entre ellas a la más probable, es preciso recurrir a la información arqueológica o complementar y cruzar la información con aquella obtenida por otros métodos no radiométricos usados en los estudios arqueológicos. Uno de estos métodos es la **asociación estratigráfica**. En ella se utilizan las dataciones previamente realizadas en etapas estratigráficamente contiguas (anteriores o posteriores) a la etapa de estudio para asociarle a esta una edad relativa a las demás. Esta técnica puede proveer fechas exactas si las fases están bien identificadas y si se han tomado en cuenta los niveles no horizontales, depósitos culturales, así como intrusiones y canales erosivos que cortan la estratigrafía.

Otra fuente de información para la datación en los contextos arqueológicos es el estudio del **estilo cerámico**. Su estudio a nivel macroscópico discrimina entre la elaboración con diferentes materias primas, técnica de manufactura, relación función-forma así como las características estilísticas de la decoración. Se estudian, a nivel microscópico, las propiedades químicas de las cerámicas como su contenido de fosfatos y carbonatos, pérdida de humedad, plasticidad, concentración, color y textura después de la cocción. Además se analizan las propiedades mecánicas del material ante la aplicación de esfuerzos y variaciones de temperatura.

El estudio y clasificación de los objetos mediante las técnicas anteriormente mencionadas permite establecer una cronología basada en los estilos de cerámica. Estos se asocian con un periodo cultural bien definido y de corta duración, lo que permite establecer dataciones más exactas de las muestras analizadas.

### 4.1.1 La curva de variación secular y el programa RENDATE

#### Antecedentes

La primera curva de variación secular para Mesoamérica fue construida por Wofman en 1973 como parte de su tesis de doctorado. Para ello tomó 81 muestras de sitios arqueológicos de México: Cerro Zapotecas(1), Huapalcalco(2), Manzanillo(2), Teotihuacan(9), Tula(8), Chachi(1), Panteon(2), Brawbehl(1),Lambityeco(4), Monte Albán(2), Tierras Largas(2), Tomaltepec(2); de El Salvador: Altamira(1), Mango(1), San Andrés(4),Tazumal(1), Tronconera(2); de Guatemala: Kaminaljuyu(29) y El Portón(1) y de Honduras: Copán(6).

Las muestras en su mayoría fueron datadas por estratigrafía y estilo cerámico, además, todas eran muestras quemadas y mostraban  $\alpha_{95}$  menores a  $4^\circ$ , por tanto sólo 10 fueron desmagnetizadas mediante campos alternos para ver su comportamiento.

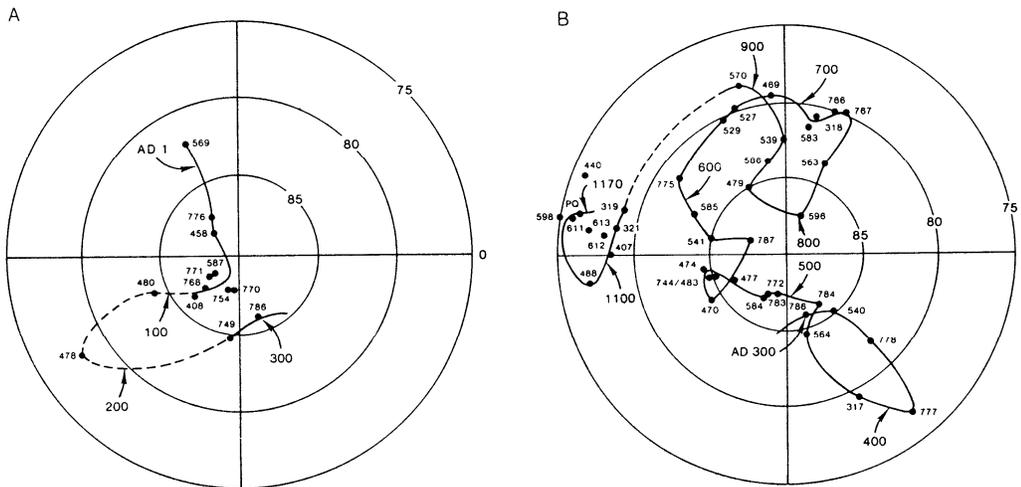


Figura 25 Curva obtenida por Wolfman 1990

En la figura 25 se muestra la curva obtenida por Wolfman en dos fragmentos, A) del año 1dC al 300 dC y B) del 300 al 1200 dC, el autor construyó la curva basado en la distribución de los polos geovirtuales siguiendo la superposición estratigráfica y la arquitectura y cerámicas asociadas. En la primera parte de la curva se denota la falta de datos entre los años 100 y 300 dC como también para la segunda entre el 915 y 1060 dC.(Wolfman, 1990).

En el año 2000 se construyó una nueva curva que se reporta en Hueda, (2000) y en Hueda et al, (2004). Esta curva tomó los datos de Wolfman anexo los de una estalagmita de San Luís Potosí del 750 al 1950 dC (Latham et al.,1986) , la erupción del Xitle(Urrutia, 1996) y datos históricos y de observatorios (Urrutia, 1975). Aquí se tomaron los datos de Wolfman con sus correspondientes dataciones estratigráficas no arqueomagnéticas y se realizaron promedios con estadística Fisher para una ventana de 100 años de longitud con un desplazamiento cada 50 años.

Las dataciones efectuadas en ese momento fueron con el método de LeGoff et al.,2002 y Noel y Batt,1990, que consiste en comparar las direcciones medias obtenidas con la curva de variación secular. Se puede encontrar más de un punto de coincidencia, por lo que se deben de discutir los resultados con los arqueólogos de campo que con su conocimiento de estratigrafía de excavación nos permitirán restringir los resultados.

En 2004 Lannos desarrolló el programa RENDATE (Lannos,2004), que consiste en un inferencia bayesiana para las curvas de variación secular. La datos de la curva de variación secular declinación e inclinación fueron adaptados para este programa. Los datos incluidos eran además de los antes mencionados, datos nuevos que contaban con datación de radiocarbono. En lugar de reportar la curva mediante polos geovirtuales (latitud y longitud), las declinaciones e inclinaciones que dependen de la localidad en que se toma la muestra es calculada para la ubicación de Teotihuacan (19.69°N,98.84°W) por ser el sitio con mayor número de muestras hecho por el grupo de arqueomagnetismo de la UNAM.

El procedimiento para introducir los datos de la curva consiste en introducir primero los datos sin tratar, esto es los datos de la dirección media, declinación e inclinación. La declinación e inclinación aparecen en el gráfico del programa como datos unidos mediante rectas, sobre todo en los intervalos de tiempo en que se cuenta con un menor número de datos. Los valores de  $\alpha_{95}$  correspondientes a cada dirección media, también son introducidos. Después de ser suavizados los datos mediante splines cúbicos obteniéndose un valor de declinación e inclinación por año, se introducen en un archivo que es leído por el programa. Estos archivos en nuestro caso son okdec8a.ref para los datos de declinación e incsuav5.ref para los de inclinación.

El programa RENDATE calcula las intersecciones tanto para inclinación (Fig.26) como para la declinación (Fig.27), tomando en cuenta el  $\alpha_{95}$  de la muestra y las combina (fig.28) para obtener así las fechas con un 95% de probabilidad, que son las gráficas resultantes que se reportan en este trabajo.

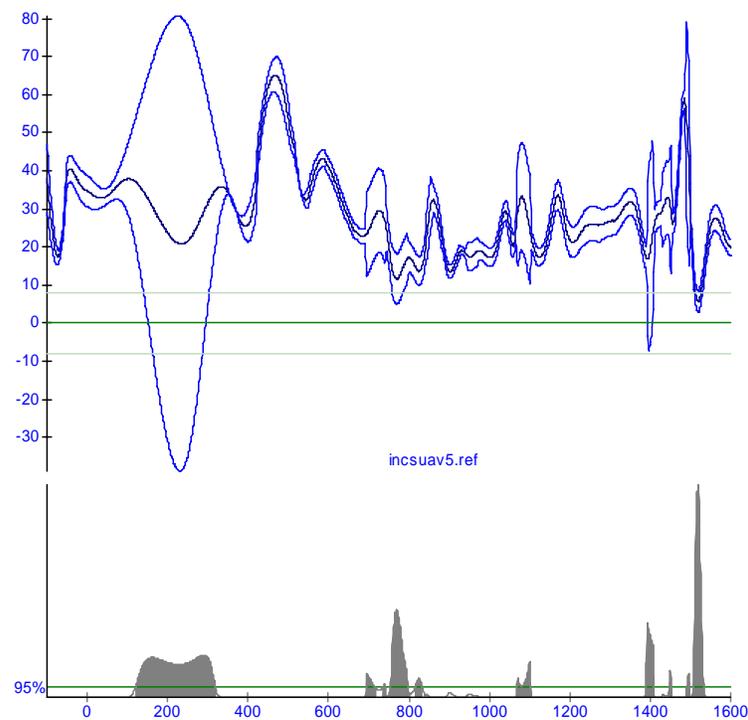


Fig. 26 Grafica de inclinación de  $0^\circ$  y  $\alpha_{95}$  de  $10^\circ$  con la curva incsuav5.ref, para los años 100aC -1600dC

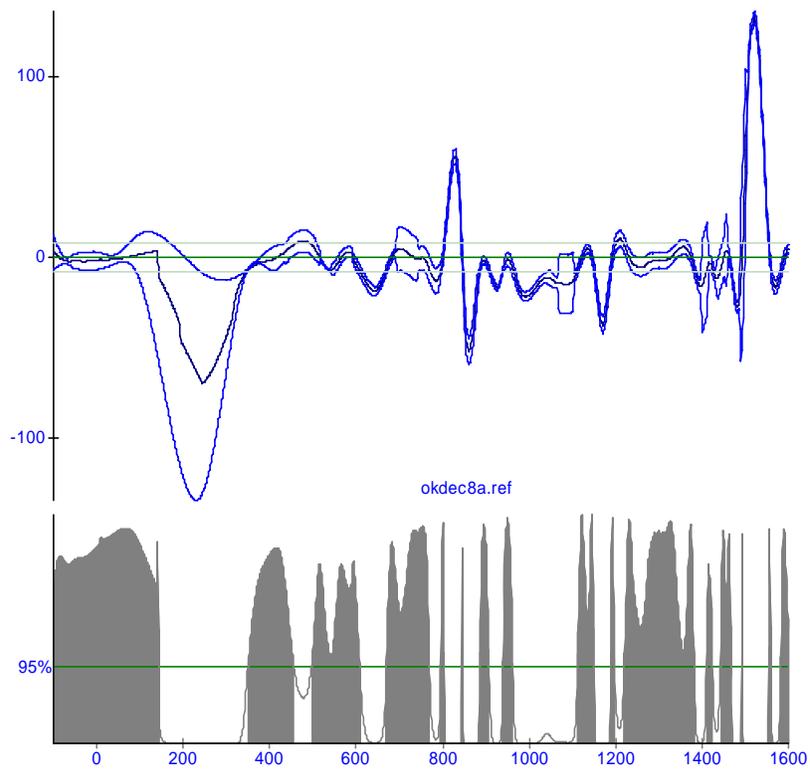


Fig. 27 Grafica de declinación de  $0^\circ$  y  $\alpha_{95}$  de  $10^\circ$  con la curva okdec8a.ref, para los años 100aC-1600dC

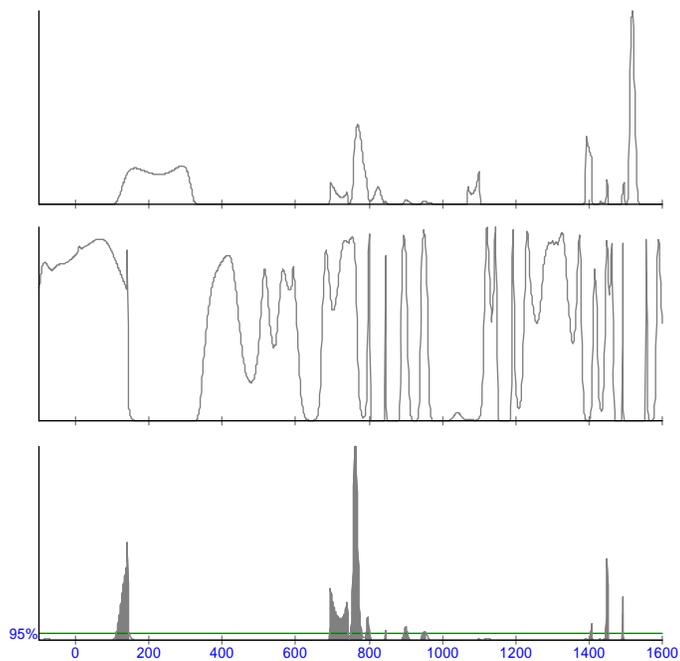


Fig. 28 Combinación de las curvas de inclinación y declinación para una muestra

Threshold =1E-3 with confidence = 95%  
Between t=-100 and 1600  
[112-145]  
[693-743]  
[750-779]  
[792-802]  
[845-845]  
[895-905]  
[946-955]  
[1405-1408]  
[1446-1453]  
[1491-1493]

Intervalos d tiempo correspondientes a la doble intersección de la declinación y la inclinación, con 95% de confianza de coincidencia con la dirección promedio, Dec=0° e Inc=0° y  $\alpha_{95}$  de 10°

Como se observa existen varios intervalos de coincidencia y por tanto debe de consultarse con el arqueólogo para de acuerdo a la estratigrafía elegir la datación arqueomagnética.

#### 4.2 Recolección de muestras

Hace más de 40 años surgió una forma general para la recolección de muestras arqueomagnéticas sugerida por arqueólogos norteamericanos. La estrategia de recolección usada actualmente fue introducida por el geofísico Robert DuBois, a comienzos de la década de 1960, quien se dedicó a establecer el registro principal de los cambios en el campo magnético terrestre en el suroeste de los Estados Unidos. DuBois modificó el método de recolección de muestras arqueomagnéticas desarrollado por Watanabe (1959) en Japón y por Aitken (1974) y Thelie (1967) en Europa. Las piezas “*in situ*” de muestras arqueológicas quemadas eran aisladas en bloques cuadrados con una diagonal que corría aproximadamente norte-sur. Sobre este bloque DuBois colocaba un molde metálico cuadrado puesto en un collar de arcilla ordinaria modelada. Con un instrumento de orientación hecho en Japón, simultáneamente nivelaba y giraba ligeramente el molde para introducirlo dentro de la arcilla, que de esta manera este quedaba perfectamente horizontal y se colocaba una diagonal dirigida hacia el norte magnético. Entonces DuBois llenaba el molde con yeso recubriendo la pieza de material quemado. Experimentó con varios tipos de yeso hasta que encontró uno resistente y no-magnético. Los lados y la cara superior del cubo de yeso servían para orientar el espécimen, debido a que cada lado superior no tenía profundidad y las

diagonales corrían norte-sur y este-oeste. Seis de ocho especímenes servían como una muestra arqueomagnética.

El procedimiento introducido a Estados Unidos por DuBois funcionó muy bien y permitió coleccionar muestras que produjeron estimaciones extremadamente confiables de paleodirecciones. Las modificaciones subsecuentes en el procedimiento han servido no tanto para mejorar la precisión de la recolección sino para hacer más ampliamente disponible esta técnica.

Una de las primeras modificaciones en la técnica fue el reemplazo del dispositivo de orientación construido específicamente para arqueomagnetismo con una brújula de bolsillo. El control horizontal de la dirección de la muestra no requiere que la muestra sea orientada en una orientación preferente, sólo se necesita saber su orientación real. Por lo tanto, más que marcar diagonales en el espécimen para indicar norte-sur y este-oeste, las muestras se cortan en cualquier orientación conveniente, y su orientación se mide con una brújula de bolsillo. El control vertical todavía se hace mediante niveles, pero en vez de que estos estén montados en el dispositivo de orientación ahora se utilizan niveles simples de control-cruzado. Estas modificaciones tienen la ventaja de determinar la dirección del espécimen solamente por medio de la localización y la orientación del material quemado en vez de orientar al espécimen norte-sur. Con estas modificaciones, tanto el control horizontal como el vertical pueden mantenerse fácilmente dentro de 30 minutos de arco.

Una modificación reciente es el tamaño del cubo. En el tiempo en que DuBois comenzó a trabajar, los magnetómetros de laboratorio no se obtenían comercialmente por lo que DuBois construyó el suyo que estaba diseñado para acomodar cubos de 4.32 cm. Los magnetómetros modernos son más sensibles y confiables y aceptan cubos de 4.32 cm y de 2.54 cm.

En el laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México se adhieren testigos de madera, de 2.54 cm de base y 1 cm de espesor, al material arqueológico usando resina epóxica libre de elementos magnéticos; estos testigos fueron orientados con

una brújula *in situ* para su procesamiento posterior en el laboratorio.

Además de estas pequeñas modificaciones, las características esenciales de la recolección de muestras han cambiado poco en los últimos cuarenta años.

En este punto es necesario introducir algunas definiciones útiles para entender el procedimiento de recolección de muestras y su posterior análisis en el laboratorio:

**Espécimen:** Pieza de material quemado o no quemado colectado "*in situ*" con control horizontal y vertical y que constituye una lectura arqueomagnética. Los investigadores dedicados al paleomagnetismo usualmente utilizan espécimen como muestra. En nuestro caso es un cilindro circular de 2.54 cm de base y 2.1 cm de altura.

**Muestra:** Varios especímenes de material quemado o no quemado.

Como ya se mencionó, mucho del magnetismo remanente en la arcilla es adquirida a temperaturas alrededor de los 400-500° C. Además de la temperatura, la calidad de la muestra arqueomagnética está definida por el porcentaje de arcilla, su mineralogía, y la homogeneidad del material y su tiempo de exposición al fuego. Las colecciones arqueomagnéticas sugieren que muchos suelos arqueológicos tienen material ferromagnético suficiente para adquirir magnetización termoremanente como componente vectorial primaria de buena calidad. El material de grano fino (<0.5 mm) mantiene la remanencia mejor que el material de grano grande y grueso. Las muestras homogéneas son mejores que la no-homogéneas (arcillas con rocas o inclusiones orgánicas o culturales). (Eighmy et al, 1990)

#### **4.2.1 Contenido mineral de las muestras**

Es casi imposible determinar en el campo la mineralogía exacta de la muestra. Sólo se puede identificar con relativa certeza la presencia de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Cuando se quema al aire libre, la contaminación ferromagnética de muchos suelos se torna naranja, rosa o roja mientras la tasa de oxidación crece y se forma

la hematita. La oxidación también se acelera cuando se incrementan las temperaturas, pero los cambios de color son menos perceptibles; por lo tanto, el material quemado con un cambio de color al naranja indica la presencia de alguna pero no de todas las formas de materiales ferrosos. El cambio al color naranja es una muestra significativa de la calidad del material para estudios arqueomagnéticos. El material quemado en una atmósfera reductora produce magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y pueden ser de buena calidad para estudios arqueomagnéticos. De hecho, la magnetización de la magnetita es casi 200 veces más fuerte que la de la hematita. El problema aquí es distinguir la magnetita de las superficies teñidas con carbón ordinario. Cuando se forma, la magnetita produce un color negro que puede tener una apariencia idéntica a muchos pisos oscuros no-quemados. Posiblemente la mejor manera de distinguir la formación de magnetita es el cambio de color a oscuro en el suelo. Como se puede notar, el cambio de color se vuelve extremadamente importante para asegurarse de la presencia de minerales magnéticos en campo. (Eighmy et al, 1990)

#### **4.2.2 Grado de exposición al fuego**

Así como no es posible, en campo, saber con exactitud el contenido mineral de la arcilla, tampoco es posible saber con exactitud la temperatura de cocción de las muestras. Los experimentos controlados utilizando distintos hornos y combustibles exhiben su importancia, cuando el colector puede confiar en los resultados y caracterizaciones de aquellos experimentos de cocción y datos superficiales, para la recolección de muestras. En general es seguro asumir que el suelo subyacente en la superficie de hornos quemados, cuartos quemados y estufas, estuvo expuesto a temperaturas suficientemente altas para obtener datos arqueomagnéticos.

Anna O. Shepard (1954) midió la temperatura de 11 grandes fuegos abiertos utilizados para cocer vasijas. Las temperaturas máximas en estos fuegos estuvieron entre  $675^\circ$  y  $950^\circ$  C y fueron alcanzadas después de 40 minutos a una hora. A pesar de que estos fuegos tienden a ser más grandes que las fuegos para calentar o que los utilizados para cocinar, es posible que estos pequeños fuegos alcancen temperaturas máximas similares. La arcilla debajo de estos fuegos, posiblemente, no alcanza estas temperaturas. En tres hornos experimentales, la

temperatura del suelo medio centímetro debajo y encima de la superficie calentada alcanzó solo 450° C (Krause, 1980), y en cuatro hornos “calientes” (Hathaway, 1982) la temperatura a 1 cm era menor que el 75% de la que se alcanzaba a 0.25 cm debajo de la superficie. La temperatura absoluta de los cuatro hornos de Hathaway 0.25 cm debajo de la superficie promediaron cerca de 250° C. En ambas situaciones experimentales, los hornos fueron encendidos a temperaturas mayores que las utilizadas “normalmente” para cocinar o las de fuegos para calentarse. (Eighmy et al, 1990)

# Capítulo 5. Sitios de estudio y problemas a resolver

---

La ciudad de Teotihuacan representa un sitio único en muchos sentidos. No sólo fue una de las mayores aglomeraciones urbanas que conoció el México antiguo sino que en su época de esplendor llegó a ser la sexta ciudad más grande del mundo, sólo detrás de centros urbanos como Constantinopla y Alejandría. Sus dimensiones y complejidad hicieron de este asentamiento el más importante e influyente de su época y lo convirtieron en una urbe cuya presencia se deja sentir prácticamente por toda la Mesoamérica del periodo Clásico (100-650 d.C) y cuyo prestigio trascendió varios siglos posteriores a su caída. En su apogeo (entre 350-550 d.C.) Teotihuacán tenía una población de cerca de cien mil habitantes y contaba con cerca de dos mil conjuntos habitacionales en una extensión de 20 km<sup>2</sup>. (Solanes *et al*, 2000)

Teotihuacan es un fascinante laboratorio para comprender la interacción multiétnica. Aquí confluyeron pueblos diversos que huyeron de las erupciones volcánicas del sur de la cuenca de México durante el siglo I de nuestra era y que llegaron al valle de Teotihuacan que ya estaba poblado con grupos formativos, generando una articulación original sobre la cual se insertaron otros de la costa del Golfo y del occidente de México.

Para organizar a grupos humanos de tantos orígenes, intereses y estrategias, el grupo que le dio forma a la ciudad quizás consideró que el orden podría ser una manera de organizar a la mano de obra así como para atraer a grupos de diversas regiones en los esfuerzos de construcción, manufactura y movimiento de bienes. (Manzanilla, 2007)

Teotihuacan representa además una ciudad única en Mesoamérica no sólo por su tamaño, grado de

planificación, su organización corporativa y la multiétnicidad de su población sino por haber sido un gran centro de acopio de bienes de otras regiones. Para Linda Manzanilla, Teotihuacan pudo haberse conformado como una federación de barrios que organizaban caravanas hacia distintos sitios para obtener mano de obra especializada, mantas de algodón, animales marinos, pigmentos cosméticos, cerámica foránea, obsidiana, travertino, etc. (Manzanilla, 2007, 2011)

Durante numerosas temporadas de excavaciones extensivas en Teotihuacan se han detectado materias primas y bienes procedentes de otras regiones de Mesoamérica, particularmente la costa del Golfo. Se encontró evidencia del consumo de por lo menos doce especies distintas de peces de las lagunas costeras que probablemente arribaban saladas o ahumadas, cangrejos, cocodrilo, garceta de la costa del Golfo, mantas de algodón, conchas marinas (del Golfo, del Caribe y del Pacífico) y mano de obra.

Desde 1981, Ángel García Cook propuso la existencia de corredores de sitios organizados por los teotihuacanos para acceder a las zonas de bienes o productos de lujo en la costa del Golfo de México. (Manzanilla, 2011)

Particularmente el corredor que parte de Teotihuacan y pasa por Xalasco, Tlaxcala, para bajar hacia la llanura costera del Golfo y dirigirse a la zona de Nautla, Veracruz, así como el yacimiento de obsidiana de La Sierra de Las Navajas, Hidalgo (Figura 19) fueron, junto con La Ciudadela en Teotihuacan, los sitios de estudio de esta tesis y a continuación se describen brevemente.

**5.1 La Ciudadela** en Teotihuacan (Estado de México): esta conformada por edificaciones relacionadas con la administración y el ejército. La Ciudadela es un conjunto arquitectónico localizado en la banda poniente de la Calzada de los Muertos. El conjunto forma una gran plaza cuadrangular de aproximadamente 400 metros por lado y fue construido entre los años 150 y 250 d.C. El conjunto de La Ciudadela comprende también la pirámide de La Serpiente Emplumada, a la que rodean trece templos secundarios construidos sobre una plataforma. Detrás del templo de Las Serpientes Emplumadas se encuentran conjuntos habitacionales que pudieron estar

reservados para la élite teotihuacana. Los estudios arqueológicos de La Ciudadela se iniciaron en 1864 y además de que se han localizado diversos objetos de obsidiana, conchas y rocas semipreciosas, se localizó un sistema funerario integrado por 137 osamentas tanto en entierros múltiples como individuales. La Ciudadela se convirtió en el centro político, cultural y económico de la ciudad de Teotihuacan sustituyendo finalmente a la pirámide del Sol (Matos-Moctezuma, 2003).

La Ciudadela es considerada el centro rector y político del Estado teotihuacano. Desde hace varios años se ha investigado su secuencia arquitectónica para entender su significado y su importancia. Se han dado a conocer de manera parcial algunos resultados de las investigaciones, en lo que se refiere a la arquitectura y secuencia del templo; asimismo, se ha presentado información relevante relacionada con el significado ideológico del Templo de Quetzalcoatl y de los personajes que fueron inmolados en este lugar (Cabrera, 1998). Sin embargo no se cuenta con una cronología completa y bien documentada del desarrollo arquitectónico del gran conjunto de La Ciudadela y de sus componentes, salvo quizá la estructura más importante, es decir, el Templo de Quetzalcoatl donde ha sido estudiada la mayor parte de la cerámica encontrada en excavaciones profundas.

La información acerca de su secuencia constructiva y de su datación se fundamenta en varias excavaciones profundas llevadas a cabo en tiempos diferentes y en lugares estratégicos de esta gran unidad urbana. A través de las excavaciones profundas realizadas en el periodo 1980 – 1989, se localizaron numerosos entierros humanos que fueron inmolados en conmemoración a la erección del Templo de Quetzalcoatl.

Ahora se sabe que el espacio donde se erigió el gran conjunto de La Ciudadela estaba ocupado con anterioridad por numerosas construcciones teotihuacanas que fueron demolidas para obtener un amplio espacio donde se pudo construir este magno conjunto diseñado desde un principio.

Respecto a la construcción del Templo de Quetzalcoatl, con base en estudios de la cerámica recuperada del basamento en capas no alteradas se había propuesto que este edificio se erigió durante las fases Miccaotli-Tlamimilolpa temprano (150-200 d.C.) Sin embargo, nuevos hallazgos en el mismo templo de donde se

podieron practicar análisis de  $^{14}\text{C}$  a muestras de carbón, concha y huesos humanos indican gran espacio temporal para la construcción del templo (Cabrera, 1998; Sugiyama, 1998). Como las muestras provienen de diferentes partes del basamento, aunque de la misma etapa constructiva, se aplicaron diversos métodos a los materiales extraídos de los túneles, los entierros y las ofrendas todas ellas encontradas en el Templo de Quetzalcoatl. Las dataciones dan un rango muy extenso: de 215 a.C. a 405 d.C. por lo que Sugiyama propuso en 1998 no sólo tener en cuenta los contextos arqueológicos sino además hacer un promedio de las fechas que se tenían para dar una referencia razonable a la fecha promedio de la construcción del basamento (210 d.C.)

El Templo de Quetzalcoatl al parecer sufrió una serie de modificaciones, destrucciones y saqueos después de concluida su construcción. En algunos casos los datos no son completos, y muchos materiales disponibles no son datables. Sin embargo, todo sugiere que hubo un cambio fuerte, tal vez en el siglo IV, en el Templo de Quetzalcoatl (Figura 29).

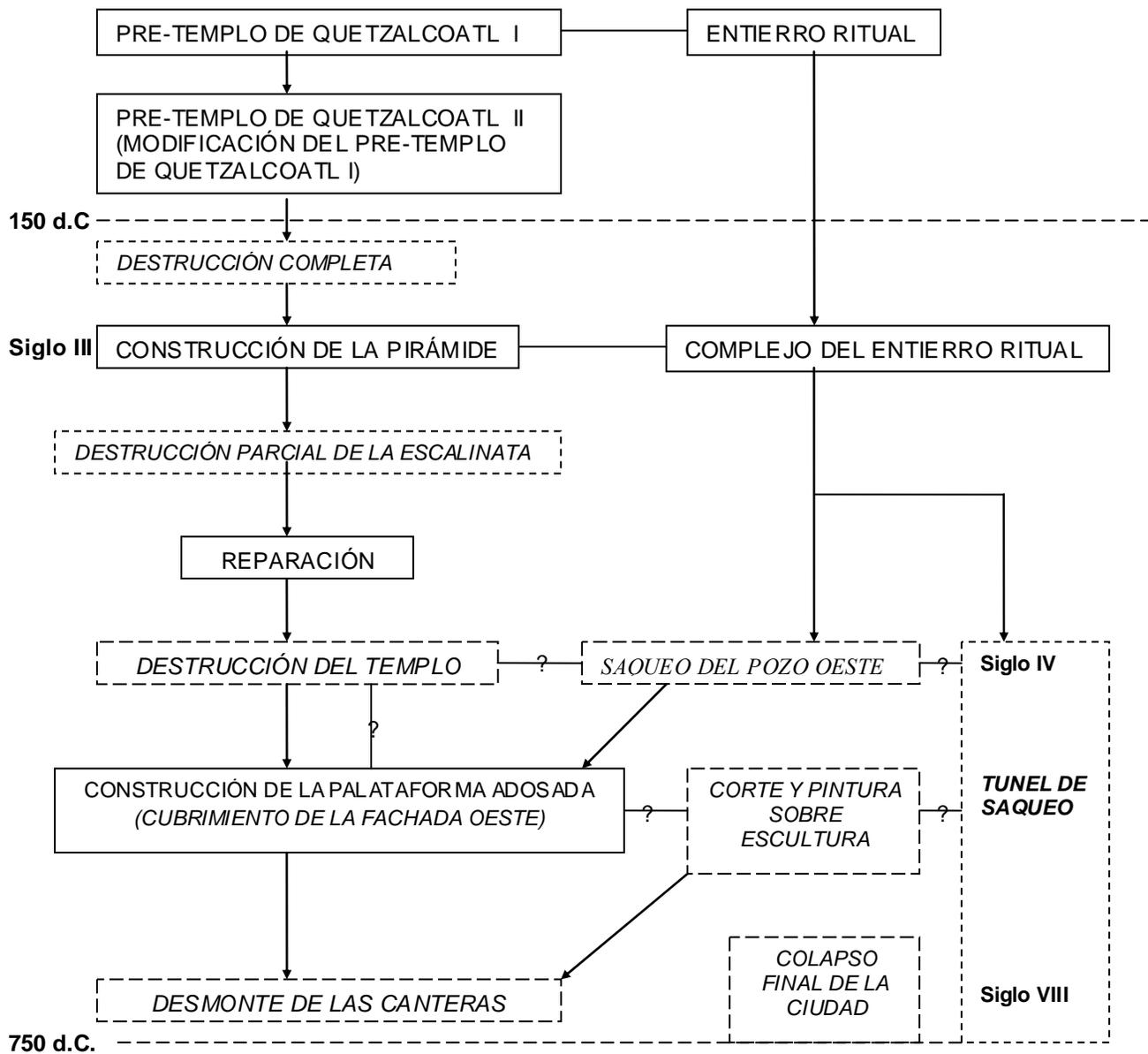
Como se muestra en la Figura 29, después de destrucciones parciales del Templo, la mayor parte de la fachada principal fue ocultada por la Plataforma Adosada que es una evidencia de la profanación de las deidades representadas en la fachada. Este ocultamiento fue acompañado por saqueos de tumbas. Esta serie de acciones de profanación al Templo de Quetzalcoatl indican que no sólo fue una modificación o un cambio parcial de una forma religiosa a otra, sino un programa de terminación de una cosmovisión. Este suceso no ha podido datarse con precisión debido a la carencia de datos.

La cronología de la destrucción final del conjunto Templo de Quetzalcoatl-Plataforma Adosada no se comprende aún con precisión a pesar de las abundantes evidencias de destrucción. Según las medidas y formas de una pieza encontrada en una tumba del Barrio oaxaqueño que Millon excavó en 1973 parece haber formado parte originalmente del Templo de Quetzalcoatl, por lo que es probable que la destrucción del basamento tuviera lugar antes de la construcción de la tumba del “barrio oaxaqueño” que se ha fechado hacia el siglo VII. El periodo de saqueo de las tumbas del Templo de Quetzalcoatl está fechado del 15 al 743 d.C. por lo que se puede

decir que hubo saqueos después de concluir la construcción del basamento y continuaron hasta el siglo VIII d.C.

No se conoce con exactitud el objetivo principal de las acciones de destrucción, construcción y saqueos de tumbas en diferentes partes de Templo pero podrían sugerir un programa institucional que tenía objetivos probablemente políticos más que acciones individuales y esporádicas para procuramiento de ofrendas. Al parecer todas las acciones realizadas en el Templo de Quetzalcoatl incluyeron cambios en la sociedad teotihuacana, sin embargo se requiere mayor evidencia de otros recintos de la metrópoli para asegurar esto.

(Sugiyama, 1998).



**Figura 29.** Relación cronológica de sucesos ocurridos en el Templo de Quetzalcoatl. (Tomado de Sugiyama, 1998)

Tabla 5.1 Acontecimientos propuestos por Cabrera, 1998

<b>ACONTECIMIENTOS NOTABLES EN EL TEMPLO DE QUETZALCOATL Y EN LA CIUDADELA</b>	
150 - 200 d.C.	Rituales a gran escala: sacrificios humanos. Cuerpos colocados hacia los 4 puntos cardinales. Por el número de cuerpos los sacrificios pueden estar relacionados con el cómputo del tiempo y su cosmogonía.
	Destrucción intencional de las fachadas del Templo de Quetzalcoatl. Fueron cercenadas y recubiertas con estuco rojo las grandes cabezas de serpiente representadas en sus fachadas.
200 – 350 d.C.	<p>Construcción de Plataforma Adosada que cubrió la fachada principal del edificio anterior. Esta se construyó poco después del Templo de Quetzalcoatl al inicio de la fase Tlamimilolpa – Tardío.</p> <p>Época muy violenta en la sociedad teotihuacana motivada por problemas religiosos, políticos e ideológicos. Esta violencia se manifiesta en otras partes de la ciudad como el mural “Animales mitológicos” con datación 250 d.C. o posterior.</p>
400 d.C.	Intenso saqueo de tumbas del Templo de Quetzalcoatl por medio de túnel
575 d.C.	Gran saqueo y alteración de tumbas del Templo de Quetzalcoatl durante el colapso de Teotihuacan

Tabla 5.2 Acontecimientos propuestos por Cabrera, 1998

<b>CRONOLOGÍA DE OTROS EDIFICIOS DE LA CIUDADELA</b>		
<b>EDIFICIO</b>	<b>FECHA</b>	<b>ACONTECIMIENTO</b>
<b>Estructura 1B'</b>	Sin cronología por falta de preservación de material cerámico debido a saqueos. La destrucción del edificio dificulta entender su secuencia	
<b>Edificio 1C:</b> Adoratorio central ubicado en la explanada	Sin cronología por falta de material debido a múltiples saqueos.	
	200 d.C.	Se establecen habitantes del barrio oaxaqueño. Relación con Monte Alban.

<b>CRONOLOGÍA DE OTROS EDIFICIOS DE LA CIUDADELA</b>		
<b>EDIFICIO</b>	<b>FECHA</b>	<b>ACONTECIMIENTO</b>
<b>Unidad habitacional 1E</b> : Ubicada en el lado sur del Templo de Quetzalcoatl	Datos suficientes para conocer secuencia constructiva sin embargo la cerámica obtenida no ha sido procesada y no se puede establecer cronología. Cuatro niveles de ocupación: Piso 4, el más antiguo: fase "Pre-ciudadela".	
<b>Unidad habitacional 1D</b> : ubicada en el lado norte del Templo de Quetzalcoatl	Piso 3, asociado al desplante del Templo de Quetzalcoatl. Se construyó en las fases Miccaotli-Tlamimilolpa Temprano. Piso 2, asociado al desplante del primer talud del Templo de Quetzalcoatl. Piso 1, último nivel de ocupación. Hay nuevas construcciones teotihuacanas y se erigen en los pisos ya existentes.	
	375 – 450 d.C.	Se incrementan relaciones de Teotihuacan con ciudades mayas como Tikal.
<b>Unidad habitacional 1C'</b> : ubicada en la esquina noreste de la gran explanada de La Ciudadela.	Fase Xolalpan Temprano La unidad 1C' estaba separada del conjunto 1D por la Plataforma Transversal Norte. Estas dos unidades arquitectónicas estaban unidas por amplias escalinatas.	

<b>Gran Plataforma</b> que integra La Ciudadela	Muestra varias superposiciones pero por falta de suficientes datos no se puede discutir acerca de su cronología.	
<b>Estructura 1Q</b> ubicado sobre Gran Plataforma	Tres pisos superpuestos: El más profundo corresponde a Fase Tlamimilolpa Temprano. Estructura contemporánea al Templo de Quetzalcoatl. El siguiente nivel constructivo del basamento se ubica en la fase Xolalpan Temprano y corresponde a la construcción de la Plataforma Adosada.	
<b>CRONOLOGÍA DE OTROS EDIFICIOS DE LA CIUDADELA</b>		
<b>EDIFICIO</b>	<b>FECHA</b>	<b>ACONTECIMIENTO</b>
<b>Quince basamentos</b> piramidales ubicados sobre su gran espacio	Por falta de suficientes datos no se puede discutir acerca de su secuencia y su cronología	
<b>Muro circundante</b> con funciones defensivas	Por falta de suficientes datos no se puede discutir acerca de su secuencia y su cronología	

**5.2 Xalasco (Tlaxcala):** cuenta con edificaciones de carácter administrativo y viviendas relacionadas con estos edificios. En el corredor de sitios teotihuacanos que pasa por Tlaxcala para dirigirse a la costa del Golfo, entroncaba otra ruta que conectaba con sitios del centro-sur de Puebla (Figura 30) de donde provenía el travertino, el ónix y algunas variedades de mármol y cerámica. Particularmente el sitio multiétnico de Xalasco pudo funcionar como puesto de intercambio; en él se detenían las caravanas provenientes de Teotihuacan, recibían bienes del sur de Puebla y Tlaxcala, animales marinos, mantas de algodón, sastres y otros bienes y personas. (Manzanilla, 2011)

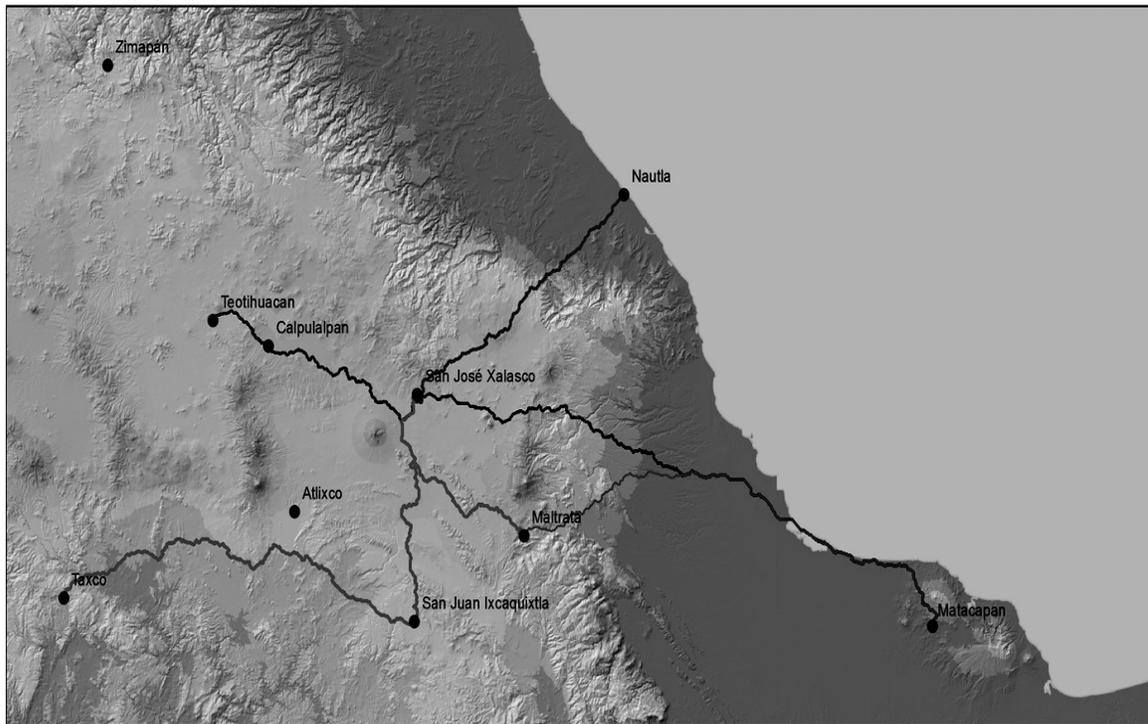


Figura 30. Corredor de sitios entre Teotihuacan y Veracruz (Tomado de Manzanilla, 2011)

Alejandro Bautista Valdespino (INAH, 2009) refiere que las investigaciones arqueológicas iniciadas desde el año 2005 en el sitio de Xalasco han permitido definir la presencia de dos culturas en el sitio: una local denominada tenayac, en el área poblano-tlaxcalteca, y otra claramente con influencia teotihuacana. Las excavaciones realizadas en el sitio entre 2006 y 2008 permitieron localizar material integrado por diversos elementos cerámicos como vasijas, candeleros, una especie de sahumerios portátiles, figurillas teotihuacanas y artefactos líticos de obsidiana, sílex y basalto representativos del periodo Clásico teotihuacano (200-700 d.C). Así mismo se localizaron braseros muy comunes y característicos de Teotihuacan que indican la adopción en Xalasco de ritos, iconografía y simbolismo de esa ciudad. (INAH, 2009)

La identificación de 15 tipos cerámicos (la mayoría de ellos de manufactura local) indica que el periodo de ocupación de Xalasco fue entre el 100 y el 700 D.C. (Manzanilla, 2009)

Linda Manzanilla (2009) añade que este proyecto de salvamento arqueológico permite reconocer elementos

(cerámica ritual y utilitaria) que indican las relaciones económicas de Teotihuacan con otras regiones de la zona costera del Golfo de México así como con regiones que poseían importantes yacimientos de obsidiana como Oyameles-Zaragoza, en Puebla; Sierra de las Navajas, en Hidalgo; Pico de Orizaba, en Veracruz y Otumba en el Estado de México.

En Xalasco se localizan rasgos arquitectónicos que confirman una orientación semejante a la característica traza urbana de Teotihuacan; un entierro infantil dentro de una olla, un entierro secundario incompleto asociado a una ofrenda compuesta por cinco vasijas de estilo teotihuacano así como áreas de actividad de talla de basalto.

Es probable que, según lo descubierto, durante el periodo Clásico mesoamericano la población de Xalasco haya albergado a un grupo de sacerdotes, guardias, artesanos y comerciantes de las caravanas. Este grupo muy posiblemente tenía filiación o provenía de Teotihuacan y formaba parte de la red de interacción en la que participaba la gran urbe.

También es posible que Xalasco formara parte de una serie de asentamientos en el valle tlaxcalteca, que integran una ruta de intercambio desde la cuenca de México hasta la costa del Golfo, atravesando el estado de Tlaxcala, desde la zona de Calpulalpan hacia el oriente llegando al sur de Puebla y de ahí a Oaxaca. A esta ruta se le conoce como Corredor Teotihuacano. (Manzanilla, 2009)

**5.3 La Sierra de las Navajas** (Hidalgo): presenta talleres de artesanos de la obsidiana y viviendas de sus familias. Debido a que la obsidiana fue un material importante para el desarrollo de la estructura estatal en el centro de Mesoamérica y posiblemente también para las culturas del occidente de México, la parte inicial del suministro y distribución para cada cultura, se encuentra en el yacimiento, que por sus características requirió de una explotación minera profunda, de talladores especializados y de un cuerpo de cargadores, todo este proceso de trabajo se basó en una organización global, en un territorio controlado en el que se realizó el transporte entre el yacimiento y numerosos centros urbanos. La etapa de explotación del yacimiento es la parte inicial de un

proceso de distribución de la obsidiana verde que tenía importancia productiva, bélica, ideológica y comercial.

El desarrollo de la urbe teotihuacana se encuentra directamente relacionado con la explotación y utilización de la obsidiana gris-negra del yacimiento de Otumba ubicado a una distancia de 20 km de la ciudad. A partir de cierta etapa del desarrollo de esta cultura se detectó un suministro y el empleo mayoritario de la obsidiana verde-dorada procedente de la Sierra de las Navajas situada a unos 50 km de Teotihuacan. La obsidiana verde se utilizó en actividades artesanales, militares y religiosas, convirtiéndose en un bien inalienable del estado de Teotihuacan.

Los teotihuacanos no conocieron la metalurgia; el desarrollo y apogeo de su cultura se debió en buena parte a los ricos recursos minerales no metálicos del valle y sus alrededores. Al oeste de Teotihuacan existen extensos depósitos de arcillas. Abundan en la zona los basaltos, el tezontle, la pizarra, la mica, el pedernal, el cuarzo y la calcedonia, útiles tanto para la construcción como para la fabricación de instrumentos de trabajo y objetos de lujo. Sin embargo, la gran riqueza derivó de los yacimientos de obsidiana, tanto de la gris de Otumba como de la verde procedente de un pequeño volcán al occidente del valle de Tulancingo y de Sierra de la Navajas, cerca de Pachuca (López Austin, 1989).

La producción de obsidiana fue el componente más importante en la economía de Teotihuacan durante el periodo Clásico. Con cientos de trabajadores y artesanos que producían puntas y cuchillos de obsidiana verde y, bifaciales de obsidiana gris para distribuirlos en toda la parte central de México. Gran parte de la población de la ciudad, quizás un 35 % estuvo conformado por especialistas no-agrícolas, muchos de ellos artesanos de la talla y uso de la obsidiana en diversos oficios artesanales como la plumería, cestería, carpintería, en la producción de armas, de parafernalia militar y religiosa, en donde la obsidiana funcionó simultáneamente como materia prima de primer orden y como instrumental básico. La obsidiana es un material muy importante en los hallazgos arqueológicos de Teotihuacan ya que provee de datos valiosos para el estudio de la especialización productiva y los patrones económicos más que cualquier otro material. (Spence, 1981)

En los recorridos arqueológicos realizados en el área del yacimiento se han localizado dos sitios en las proximidades del yacimiento; en la superficie de éstos se encuentra material lítico abundante con diferente morfología, en densas concentraciones que comprenden procesos de talla de bifaciales, cuchillos, puntas de proyectil y cuentas; numerosos fragmentos de navajas prismáticas con huellas de uso y núcleos prismáticos agotados. Posiblemente la diversidad de instrumentos utilizados en el yacimiento, se deba a la abundancia local de materia prima, que se aprovechó para explotar los recursos del bosque y de los magueyales de la zona.

También hay material cerámico correspondiente a diferentes etapas de desarrollo de la cultura teotihuacana.

Aunque los restos arqueológicos de la explotación teotihuacana en el yacimiento de la Sierra de las Navajas son los menos observables, pues se encuentran en su mayor parte, alterados y parcialmente cubiertos por las explotaciones posteriores, se han localizado algunas áreas de minas, talleres y campamentos que no sufrieron afectaciones importantes.

La extracción teotihuacana de los bloques de obsidiana se realizó por medio de minería a profundidad y a cielo abierto; la talla de instrumentos, armas y objetos religiosos produjo artefactos completos y varios tipos de núcleos para transportar a Teotihuacan. También se detectó la elaboración y la utilización especializada de navajas prismáticas y otros instrumentos en la producción de artefactos posiblemente de madera y fibras vegetales locales. Es decir, los grupos de materiales de artefactos líticos producidos en el yacimiento y también los instrumentos utilizados en él, permiten deducir que se trata de dos procesos:

- i) la producción de instrumentos, armas y objetos religiosos para su transporte (exportación de artefactos de obsidiana).
- ii) producción de instrumentos y su empleo en la elaboración de otros productos (exportación de productos) posiblemente elaborados en maderas y/o fibras vegetales locales que eran abundantes en la región por ser

una zona de bosques y magueyes desde el periodo clásico.

El asentamiento en el yacimiento consistió en campamentos temporales y en los alrededores comprenden al menos dos conjuntos habitacionales ubicados en una pequeña cuenca fluvial agrícola, con técnicas constructivas y arquitectura teotihuacana. Los campamentos teotihuacanos en el yacimiento muestran actividades habitacionales de unidades familiares con cierta permanencia, asociados a la producción de artefactos de obsidiana terminados.

Los artefactos de obsidiana y/o productos orgánicos elaborados en el yacimiento pudieron transportarse a la ciudad de Teotihuacan o bien a otras poblaciones que formaban parte del corredor teotihuacano. También es posible que se distribuyeran bajo comercio a otros centros de población ubicados en Veracruz, Puebla y Oaxaca. La presencia de estos sitios y de otros localizados pero aún no reportados, establece una ocupación del norte de la cuenca de México como territorio teotihuacano.

A partir de la caída de Teotihuacan, los toltecas y más tarde el imperio militar azteca, formado por la Triple Alianza de Tenochtitlan, Texcoco y Tacuba, continuaron utilizando ampliamente la obsidiana verde-dorada característica de este yacimiento; aún después de la conquista en el periodo de la Colonia y hasta el siglo XVII siguió su explotación y utilización aunque en menor escala. (Pastrana *et al*, 2009)

#### **5.4 Problemas a resolver**

Como se explicó ampliamente en el Capítulo 4 de esta tesis, la aplicación del método arqueomagnético ayuda a detallar y esclarecer los problemas de datación de material arqueológico, por lo que el objetivo principal de este trabajo es datar pisos quemados y no quemados de sitios arqueológicos teotihuacanos y asociados a esta cultura, por medio del método magnético.

Las dataciones obtenidas con este método se complementarán con estudios de propiedades magnéticas que

permitirán inferir características particulares de las muestras.

Los objetivos particulares de esta investigación son:

- i) Con los intervalos de tiempo obtenidos, se podrá comprender mejor el desarrollo del gran centro urbano de Teotihuacan.
- ii) A través de la datación del material obtenido del sitio arqueológico de Xalasco se contribuirá al entendimiento del papel de este enclave teotihuacano en la ruta de comercio hacia el golfo de México.
- iii) En Sierra de las Navajas se obtendrán dataciones más precisas de las diferentes etapas de ocupación de este yacimiento con el objeto de entender el desarrollo de la zona de producción de obsidiana para Teotihuacan.

# Capítulo 6. Metodología Experimental

---

## 6.1 La Ciudadela en Teotihuacan (Estado de México)

### 6.1.1 Recolección de las muestras

Se extrajeron 6 muestras en Teotihuacan en el área de La Ciudadela (CE: E1, E2; CQ: E1, E2, E3). Estas muestras fueron tomadas en diciembre de 2005 por el grupo de arqueomagnetismo del Instituto de Geofísica de la UNAM<sup>2</sup> (IGeofcu) de las cuales se obtuvieron 59 especímenes.

Además, la muestra PC que se compone de 2 bloques (PC: E1, E2) fue obtenida por Julie Gazzola del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). De esta muestra se obtuvieron 22 especímenes.

Los especímenes son cilindros circulares de 2.54 cm de diámetro y 2.10 cm de alto. Para lograr dichos cilindros, se adhirieron testigos de madera al material arqueológico usando resina epóxica libre de elementos magnéticos; estos especímenes fueron orientados con una brújula *in situ* para su procesamiento posterior en el laboratorio. En particular, para la muestra PC se obtuvo un bloque que se orientó únicamente con el norte y los testigos de madera se colocaron en el laboratorio.

Las muestras obtenidas en el sitio arqueológico de Teotihuacan (Estado de México) y procesadas en este estudio se presentan en la tabla 6.1

---

<sup>2</sup> Dras. Ana María Soler Arechalde y Cecilia Caballero Miranda

Tabla 6.1: muestras obtenidas en el sitio arqueológico de Teotihuacan (Estado de México)

Muestra	Especímenes	
CQ	E3	[cq21-cq39]
	E2	[cq11-cq20]
	E1	[cq1-cq10]
CE	E2	[ce12-ce19]
	E1	[ce1-ce11]
PC	1	[pc1a-pc1k]
	2	[pc2a-pc2k]

### 6.1.2 Localización de las muestras

Muestras CQ: Ciudadela - Quetzalcóatl



Imagen 6.1: Muestras CQ 1 a CQ 7



Imagen 6.2: Acercamiento de CO 1 a CO 5



Imagen 6.3: Acercamiento de CQ 11 a CQ 14



Imagen 6.4: Acercamiento de CQ 15 a CQ 20



Imagen 6.5: Muestras CQ 11 a CQ 20



Imagen 6.6: Muestras CQ 21 a CQ 26

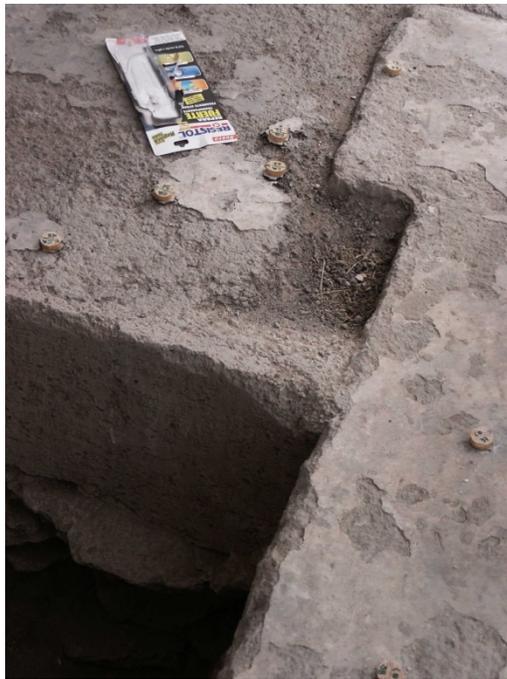


Imagen 6.7: Muestras CQ 21 a CQ 25, CQ37 y CQ 38



Imagen 6.8: Muestras CQ 27 a CQ 36

Muestra CE: La Ciudadela, Conjunto E, piso en 2 capas delgadas.



Imagen 6.9: Muestras CE 15 a CE 19. Acceso principal.

### 6.1.3 Preparación y procesamiento de las muestras

En laboratorio: 1) Se realizó un lavado magnético con campos alternos, con un desmagnetizador de marca MOLSPIN, 2) Se uso un magnetómetro JR6 para las lecturas de magnetización remanente; los dos pasos anteriores con el fin de encontrar la dirección principal de campo magnético o característica.

Para determinar la longitud de los pasos de desmagnetización con los que se trabajará en el lavado magnético, primero se obtiene la magnetización natural remanente o NRM (por sus siglas en ingles), y se eligen especímenes denominados piloto, a los cuales se les hace el lavado con intervalos de valor de campo de 5 mT, en el intervalo total [5-100] mT, según el comportamiento de dichos especímenes piloto se eligen los pasos a seguir para el resto de la muestra.

Para evitar magnetizaciones que contaminen las muestras, el magnetómetro se encuentra dentro de un blindaje magnético que elimina el campo magnético actual.

En el procesamiento de datos, los especímenes de las muestras CQ E1, CQ E2, y CQ E3 mostraron un comportamiento bastante estable, y como resultado solo se tuvo agrupamiento en la proyección estereográfica y colinealidad en el diagrama de Zijderveld (Tabla 6.2). En este caso se ajustó una recta que tiende al origen en el diagrama de Zijderveld para obtener dirección característica.

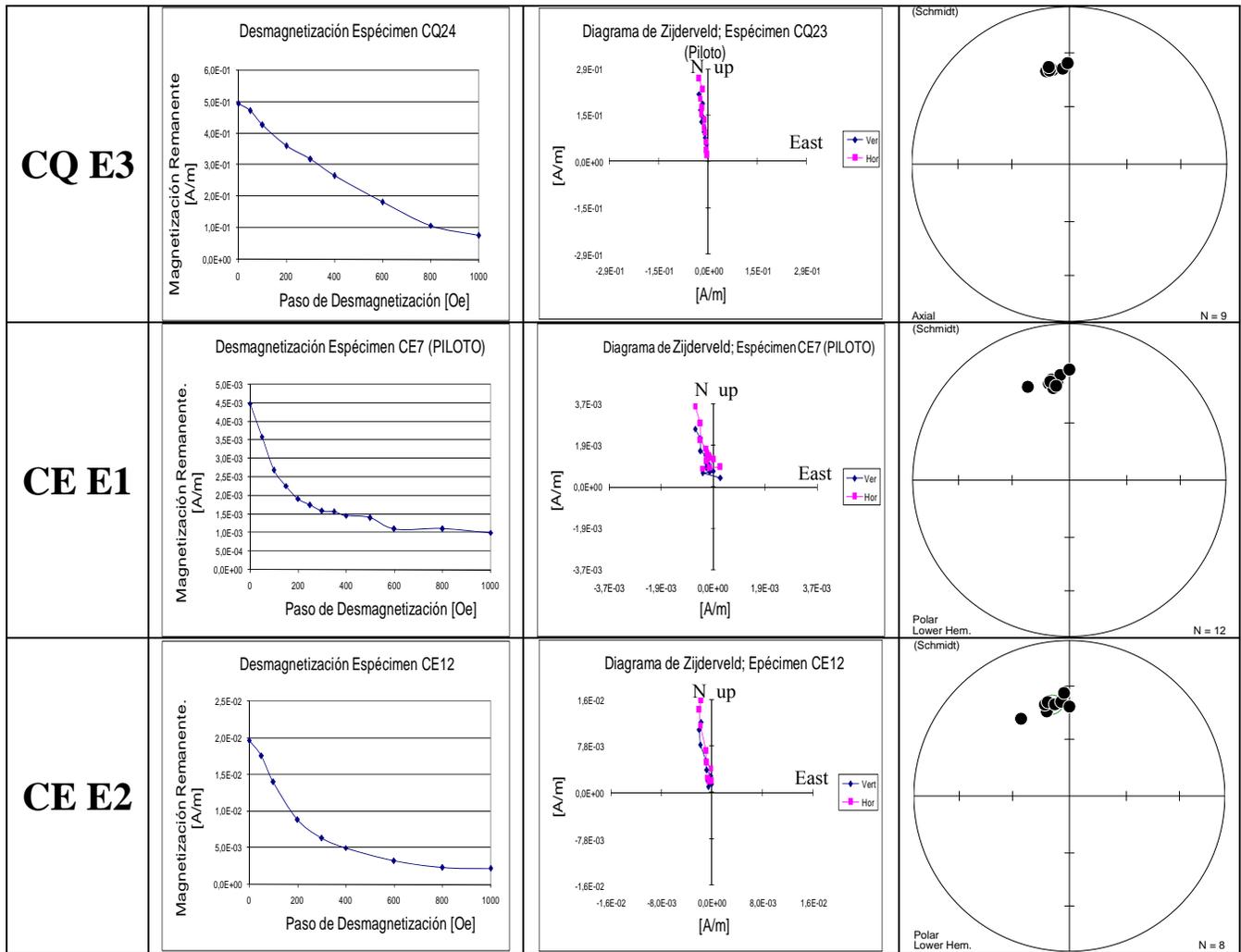
Por otro lado los especímenes de la muestra CE E1 y CE E2 mostraron un comportamiento estable por lo que se ajustó una recta que tiende al origen en el diagrama de Zijderveld para obtener dirección característica (Tabla 6.2).

En la Tabla 6.2 se muestran, de manera integrada, gráficas de desmagnetización, diagramas de Zijderveld y proyecciones estereográficas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes extraídos de las muestras CQ E1, CQ E2, CQ E3, CE E1 y CE E2. Muestras colectadas en La Ciudadela, Teotihuacan.

Tabla 6.2 Gráficas de desmagnetización, diagramas de Zijderveld, y proyecciones estereográficas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes obtenidos de las muestras CQ E1, CQ E2, CQ E3, CE E1 y CE E2. Muestras recolectadas en La Ciudadela, Teotihuacan.

	Gráfica de Desmagnetización	Diagramas de Zijderveld	Proyecciones estereográficas
<b>CQ E1</b>	<p>Desmagnetización Espécimen CQ1</p>	<p>Diagrama de Zijderveld; Espécimen CQ1</p>	<p>(Schmidt)</p> <p>Polar Lower Hem. (Schmidt) N = 9</p>
<b>CQ E2</b>	<p>Desmagnetización Espécimen CQ11</p>	<p>Diagrama de Zijderveld; Espécimen CQ11</p>	<p>(Schmidt)</p> <p>Axial N = 9</p>

Tabla 6.2 Gráficas de desmagnetización, diagramas de Zijderveld, y proyecciones estereográficas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes obtenidos de las muestras CQ E1, CQ E2, CQ E3, CE E1 y CE E2. Muestras recolectadas en La Ciudadela, Teotihuacan.



En la tabla 6.3 se muestran las proyecciones estereográficas de las muestras CQ y CE, con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media, así como los especímenes y el tipo de ajuste que se empleó para obtener la dirección característica (Línea o Plano) que intervinieron en los cálculos y los resultados de dichos cálculos con la aplicación de la deriva al Oeste.

Tabla 6.3 Proyecciones estereográficas de las muestras CQ y CE, con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media. Especímenes que intervinieron en los cálculos. Resultados de dichos cálculos.

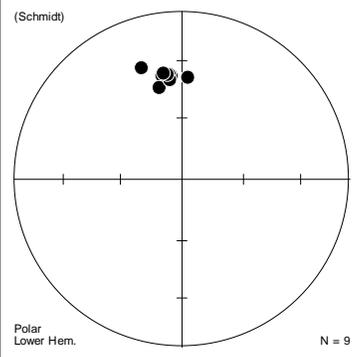
Teotihuacan Palacio de Quetzalcóatl Muestra 1 CQ E1	 <p>(Schmidt)</p> <p>Polar Lower Hem.</p> <p>N = 9</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>CQ 1</td><td>340</td><td>30</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 2</td><td>354</td><td>38</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 3</td><td>349</td><td>37</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 4</td><td>353</td><td>37</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 5</td><td>346</td><td>43</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 6</td><td>3</td><td>39</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 7</td><td>353</td><td>40</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 8</td><td>352</td><td>37</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 9</td><td>350</td><td>36</td><td>Línea</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	CQ 1	340	30	Línea	CQ 2	354	38	Línea	CQ 3	349	37	Línea	CQ 4	353	37	Línea	CQ 5	346	43	Línea	CQ 6	3	39	Línea	CQ 7	353	40	Línea	CQ 8	352	37	Línea	CQ 9	350	36	Línea	<p>Piso quemado, por la distribución puntual de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de estadística Fisher, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Declinación</th> <th colspan="2">Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">359.0</td> <td colspan="2">37.6</td> </tr> <tr> <td><math>\alpha_{95}</math></td> <td>k</td> <td colspan="2">R</td> </tr> <tr> <td>3.9</td> <td>174.4</td> <td colspan="2">8.954</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación		Inclinación		359.0		37.6		$\alpha_{95}$	k	R		3.9	174.4	8.954	
		Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																																						
		CQ 1	340	30	Línea																																																						
		CQ 2	354	38	Línea																																																						
		CQ 3	349	37	Línea																																																						
		CQ 4	353	37	Línea																																																						
		CQ 5	346	43	Línea																																																						
		CQ 6	3	39	Línea																																																						
		CQ 7	353	40	Línea																																																						
		CQ 8	352	37	Línea																																																						
CQ 9	350	36	Línea																																																								
Declinación		Inclinación																																																									
359.0		37.6																																																									
$\alpha_{95}$	k	R																																																									
3.9	174.4	8.954																																																									

Tabla 6.3 Proyecciones estereográficas de las muestras CQ y CE, con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media. Especímenes que intervinieron en los cálculos. Resultados de dichos cálculos.

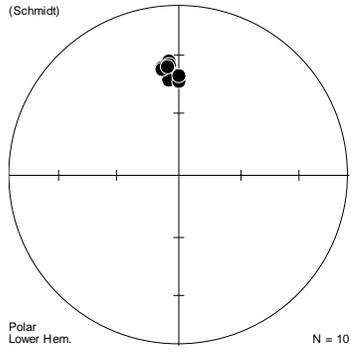
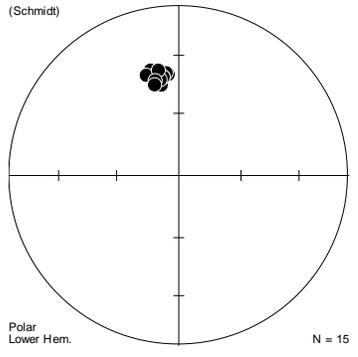
Teotihuacan Palacio de Quetzalcóatl Muestra 2 CQ E2	 <p>(Schmidt)</p> <p>Polar Lower Hem.</p> <p>N = 10</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>CQ 11</td><td>355</td><td>33</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 12</td><td>356</td><td>40</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 13</td><td>355</td><td>39</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 14</td><td>351</td><td>36</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 15</td><td>354</td><td>43</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 16</td><td>355</td><td>35</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 17</td><td>0</td><td>44</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 18</td><td>351</td><td>37</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 19</td><td>0</td><td>41</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 20</td><td>354</td><td>36</td><td>Línea</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	CQ 11	355	33	Línea	CQ 12	356	40	Línea	CQ 13	355	39	Línea	CQ 14	351	36	Línea	CQ 15	354	43	Línea	CQ 16	355	35	Línea	CQ 17	0	44	Línea	CQ 18	351	37	Línea	CQ 19	0	41	Línea	CQ 20	354	36	Línea	<p>Piso quemado, por la distribución puntual de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de estadística Fisher, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Declinación</th> <th colspan="2">Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">2.9</td> <td colspan="2">38.4</td> </tr> <tr> <td><math>\alpha_{95}</math></td> <td>k</td> <td colspan="2">R</td> </tr> <tr> <td>2.6</td> <td>353.5</td> <td colspan="2">9.975</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación		Inclinación		2.9		38.4		$\alpha_{95}$	k	R		2.6	353.5	9.975																					
		Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																																																														
		CQ 11	355	33	Línea																																																																														
		CQ 12	356	40	Línea																																																																														
		CQ 13	355	39	Línea																																																																														
		CQ 14	351	36	Línea																																																																														
		CQ 15	354	43	Línea																																																																														
		CQ 16	355	35	Línea																																																																														
		CQ 17	0	44	Línea																																																																														
		CQ 18	351	37	Línea																																																																														
CQ 19	0	41	Línea																																																																																
CQ 20	354	36	Línea																																																																																
Declinación		Inclinación																																																																																	
2.9		38.4																																																																																	
$\alpha_{95}$	k	R																																																																																	
2.6	353.5	9.975																																																																																	
Teotihuacan Palacio de Quetzalcóatl Muestra 3 CQ E3	 <p>(Schmidt)</p> <p>Polar Lower Hem.</p> <p>N = 15</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>CQ 22</td><td>351</td><td>41</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 23</td><td>354</td><td>40</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 24</td><td>348</td><td>39</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 25</td><td>353</td><td>39</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 27</td><td>347</td><td>41</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 28</td><td>347</td><td>41</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 29</td><td>349</td><td>45</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 30</td><td>351</td><td>41</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 31</td><td>345</td><td>36</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 32</td><td>351</td><td>41</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 33</td><td>349</td><td>42</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 34</td><td>342</td><td>38</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 35</td><td>349</td><td>37</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 36</td><td>346</td><td>42</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CQ 37</td><td>345</td><td>44</td><td>Línea</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	CQ 22	351	41	Línea	CQ 23	354	40	Línea	CQ 24	348	39	Línea	CQ 25	353	39	Línea	CQ 27	347	41	Línea	CQ 28	347	41	Línea	CQ 29	349	45	Línea	CQ 30	351	41	Línea	CQ 31	345	36	Línea	CQ 32	351	41	Línea	CQ 33	349	42	Línea	CQ 34	342	38	Línea	CQ 35	349	37	Línea	CQ 36	346	42	Línea	CQ 37	345	44	Línea	<p>Piso no quemado, por la distribución puntual de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de estadística Fisher, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Declinación</th> <th colspan="2">Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">348.5</td> <td colspan="2">40.2</td> </tr> <tr> <td><math>\alpha_{95}</math></td> <td>k</td> <td colspan="2">R</td> </tr> <tr> <td>1.7</td> <td>546.4</td> <td colspan="2">14.97</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación		Inclinación		348.5		40.2		$\alpha_{95}$	k	R		1.7	546.4	14.97	
		Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																																																														
		CQ 22	351	41	Línea																																																																														
		CQ 23	354	40	Línea																																																																														
		CQ 24	348	39	Línea																																																																														
		CQ 25	353	39	Línea																																																																														
		CQ 27	347	41	Línea																																																																														
		CQ 28	347	41	Línea																																																																														
		CQ 29	349	45	Línea																																																																														
		CQ 30	351	41	Línea																																																																														
		CQ 31	345	36	Línea																																																																														
		CQ 32	351	41	Línea																																																																														
		CQ 33	349	42	Línea																																																																														
		CQ 34	342	38	Línea																																																																														
		CQ 35	349	37	Línea																																																																														
		CQ 36	346	42	Línea																																																																														
		CQ 37	345	44	Línea																																																																														
Declinación		Inclinación																																																																																	
348.5		40.2																																																																																	
$\alpha_{95}$	k	R																																																																																	
1.7	546.4	14.97																																																																																	

Tabla 6.3 Proyecciones estereográficas de las muestras CQ y CE, con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media. Especímenes que intervinieron en los cálculos. Resultados de dichos cálculos.

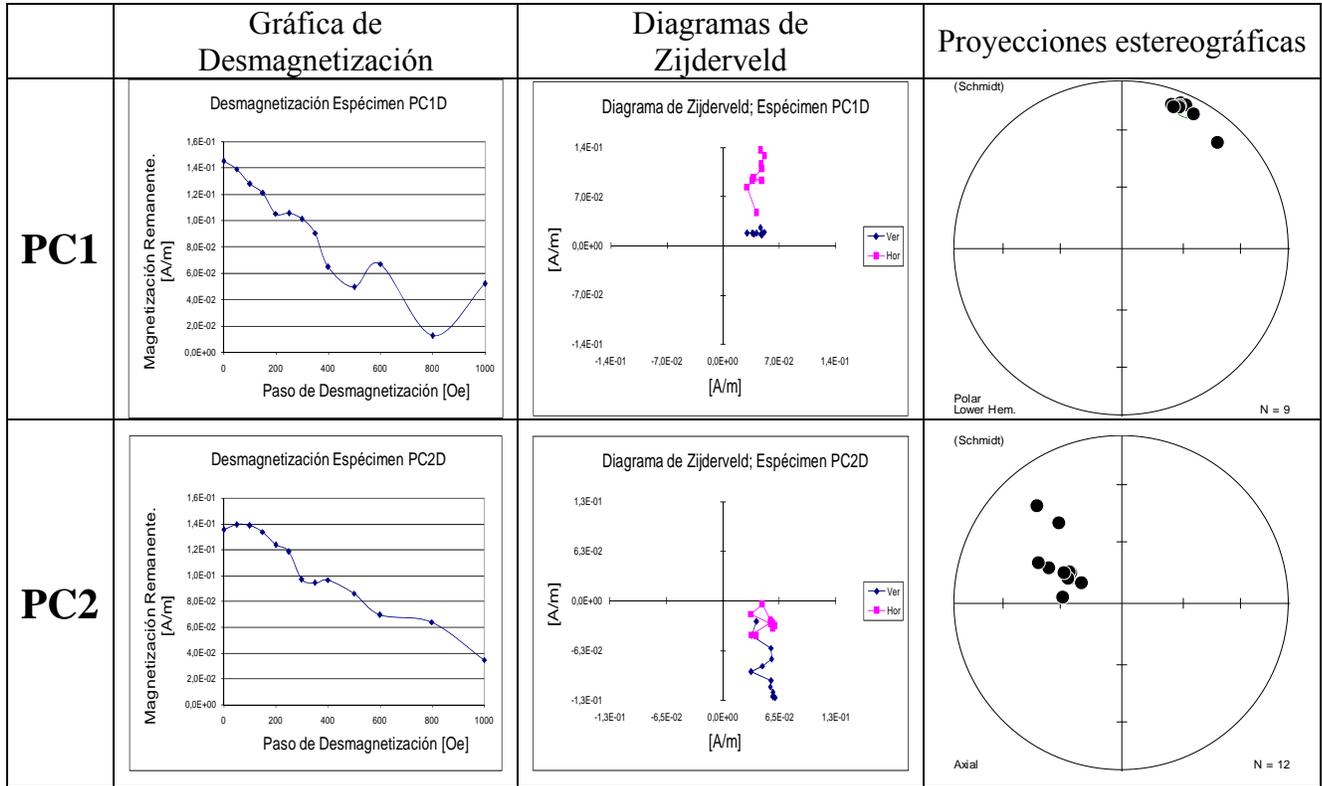
Teotihuacán Conjunto E Muestra 1 CE E1		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>CE 1</td><td>299</td><td>68</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 2</td><td>333</td><td>61</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 3</td><td>2</td><td>11</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 4</td><td>19</td><td>33</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 6</td><td>1</td><td>67</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 7</td><td>351</td><td>36</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 8</td><td>334</td><td>5</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 9</td><td>358</td><td>15</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE10</td><td>358</td><td>8</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE11A</td><td>334</td><td>51</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE11B</td><td>345</td><td>51</td><td>Línea</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	CE 1	299	68	Línea	CE 2	333	61	Línea	CE 3	2	11	Línea	CE 4	19	33	Línea	CE 6	1	67	Línea	CE 7	351	36	Línea	CE 8	334	5	Línea	CE 9	358	15	Línea	CE10	358	8	Línea	CE11A	334	51	Línea	CE11B	345	51	Línea	<p>Piso no quemado, por la distribución en un plano de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de ajuste de plano, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Declinación</th> <th>Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>359.0</td> <td>38.0</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">MAD = 16.47</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación	Inclinación	359.0	38.0	MAD = 16.47	
		Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																																				
		CE 1	299	68	Línea																																																				
		CE 2	333	61	Línea																																																				
		CE 3	2	11	Línea																																																				
		CE 4	19	33	Línea																																																				
		CE 6	1	67	Línea																																																				
		CE 7	351	36	Línea																																																				
		CE 8	334	5	Línea																																																				
		CE 9	358	15	Línea																																																				
		CE10	358	8	Línea																																																				
		CE11A	334	51	Línea																																																				
CE11B	345	51	Línea																																																						
Declinación	Inclinación																																																								
359.0	38.0																																																								
MAD = 16.47																																																									
Teotihuacán Conjunto E Muestra 2 CE E2		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>CE 12</td><td>353</td><td>36</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 13</td><td>353</td><td>32</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 14</td><td>347</td><td>40</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 15</td><td>348</td><td>37</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 16</td><td>355</td><td>42</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 17</td><td>354</td><td>37</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE18A</td><td>354</td><td>38</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE18B</td><td>359</td><td>37</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>CE 19</td><td>354</td><td>44</td><td>Línea</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	CE 12	353	36	Línea	CE 13	353	32	Línea	CE 14	347	40	Línea	CE 15	348	37	Línea	CE 16	355	42	Línea	CE 17	354	37	Línea	CE18A	354	38	Línea	CE18B	359	37	Línea	CE 19	354	44	Línea	<p>Piso quemado, por la distribución puntual de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de estadística Fisher, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Declinación</th> <th>Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.0</td> <td>38.3</td> </tr> <tr> <td><math>\alpha_{95}</math></td> <td>k</td> <td>R</td> </tr> <tr> <td>2.8</td> <td>332.2</td> <td>8.976</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación	Inclinación	1.0	38.3	$\alpha_{95}$	k	R	2.8	332.2	8.976				
		Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																																				
		CE 12	353	36	Línea																																																				
		CE 13	353	32	Línea																																																				
		CE 14	347	40	Línea																																																				
		CE 15	348	37	Línea																																																				
		CE 16	355	42	Línea																																																				
		CE 17	354	37	Línea																																																				
		CE18A	354	38	Línea																																																				
		CE18B	359	37	Línea																																																				
		CE 19	354	44	Línea																																																				
		Declinación	Inclinación																																																						
1.0	38.3																																																								
$\alpha_{95}$	k	R																																																							
2.8	332.2	8.976																																																							

Para los especímenes de la muestra PC, se obtuvieron 2 tipos de comportamiento de la señal magnética. Este caso fue un comportamiento en los diagramas de Zijderveld con dos tendencias y, por consecuencia, dispersión en las proyecciones estereográficas, (tabla 6.4). Las gráficas de desmagnetización se comportaron como decrecientes no monótonas. En este caso se utilizó la distribución sobre un plano para obtener la dirección característica o principal. En este caso la señal magnética tuvo dos componentes, las muestras obtenidas fueron de material no quemado, (tabla 6.4).

En la tabla 6.4 se muestran las gráficas de desmagnetización, los diagramas de Zijderveld y las proyecciones estereográficas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes extraídos de las

muestras PC1 y PC2.

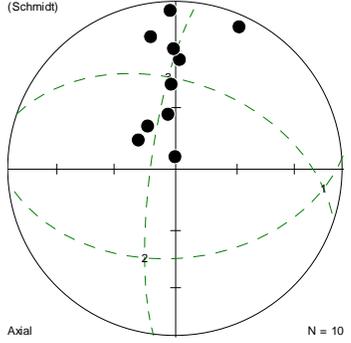
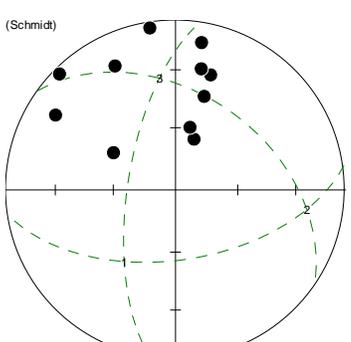
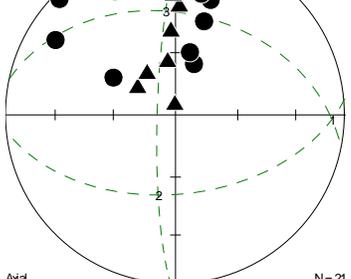
Tabla 6.4 Gráficas de desmagnetización, diagramas de Zijderveld y las proyecciones estereográficas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes extraídos de las muestras PC1 y PC2. Muestras recolectadas en La Ciudadela, Teotihuacan.



En las muestras PC 1 y PC 2 se obtuvo un comportamiento con dos tendencias, es decir, distribuciones con tendencia a un plano en la proyección estereográfica, sin embargo no fue posible obtener por separado direcciones medias que al ser intersecadas con la curva de variación secular, arrojaran intervalos de tiempo que se pudieran correlacionar con la información arqueológica del sitio, así entonces se unieron dichas muestras ya que correspondían a la misma etapa constructiva. En el caso de la unión de PC 1 y PC 2, la cual se denominó PC, se obtuvo un comportamiento con dos tendencias, es decir, distribuciones con tendencia a un plano en la proyección estereográfica, luego entonces, se ajustó un plano para obtener la dirección característica o principal. Generalmente las muestras de material no quemado presentan este comportamiento.

En la tabla 6.5 se muestran las proyecciones estereográficas de la muestra PC, con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media, así como los especímenes que intervinieron en los cálculos y los resultados de dichos cálculos con la aplicación de la deriva al Oeste.

Tabla 6.5 Proyecciones estereográficas de las muestras PC 1 y PC 2, con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media. Especímenes que intervinieron en los cálculos. Resultados de dichos cálculos.

<p>Teotihuacán Pre-Ciudadela Muestra 1 PC 1</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de Ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>PC 1A</td><td>352</td><td>63</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 1B</td><td>2</td><td>35</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 1C</td><td>357</td><td>48</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 1D</td><td>24</td><td>8</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 1E</td><td>358</td><td>6</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 1F</td><td>349</td><td>21</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>PC 1G</td><td>308</td><td>67</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 1H</td><td>357</td><td>84</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 1I</td><td>359</td><td>29</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>PC 1J</td><td>327</td><td>65</td><td>Plano</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de Ajuste	PC 1A	352	63	Plano	PC 1B	2	35	Plano	PC 1C	357	48	Plano	PC 1D	24	8	Plano	PC 1E	358	6	Plano	PC 1F	349	21	Línea	PC 1G	308	67	Plano	PC 1H	357	84	Plano	PC 1I	359	29	Línea	PC 1J	327	65	Plano	<p>Piso no quemado</p>				
Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de Ajuste																																																
PC 1A	352	63	Plano																																																
PC 1B	2	35	Plano																																																
PC 1C	357	48	Plano																																																
PC 1D	24	8	Plano																																																
PC 1E	358	6	Plano																																																
PC 1F	349	21	Línea																																																
PC 1G	308	67	Plano																																																
PC 1H	357	84	Plano																																																
PC 1I	359	29	Línea																																																
PC 1J	327	65	Plano																																																
<p>Teotihuacán Pre-Ciudadela Muestra 2 PC 2</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de Ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>PC 2A</td><td>20</td><td>64</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2B</td><td>315</td><td>4</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2C</td><td>302</td><td>18</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2D</td><td>301</td><td>55</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2E</td><td>13</td><td>59</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2F</td><td>17</td><td>42</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2G</td><td>10</td><td>13</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2H</td><td>351</td><td>4</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2I</td><td>17</td><td>30</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2J</td><td>12</td><td>28</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>PC 2K</td><td>334</td><td>20</td><td>Plano</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de Ajuste	PC 2A	20	64	Plano	PC 2B	315	4	Plano	PC 2C	302	18	Plano	PC 2D	301	55	Plano	PC 2E	13	59	Plano	PC 2F	17	42	Plano	PC 2G	10	13	Plano	PC 2H	351	4	Plano	PC 2I	17	30	Plano	PC 2J	12	28	Plano	PC 2K	334	20	Plano	<p>Piso no quemado</p>
Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de Ajuste																																																
PC 2A	20	64	Plano																																																
PC 2B	315	4	Plano																																																
PC 2C	302	18	Plano																																																
PC 2D	301	55	Plano																																																
PC 2E	13	59	Plano																																																
PC 2F	17	42	Plano																																																
PC 2G	10	13	Plano																																																
PC 2H	351	4	Plano																																																
PC 2I	17	30	Plano																																																
PC 2J	12	28	Plano																																																
PC 2K	334	20	Plano																																																
<p>Teotihuacán Pre-Ciudadela Muestras 1 y 2 PC 1 y PC 2</p>		<p>Se unieron los datos de ambas muestras, pues no era posible determinar la declinación y la inclinación por separado, allende las muestras correspondían a la misma etapa constructiva. Por la distribución en un plano de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de ajuste de plano</p>	<p>Obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Declinación</th> <th>Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3.0</td> <td>39.0</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">MAD = 13.80</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación	Inclinación	3.0	39.0	MAD = 13.80																																											
Declinación	Inclinación																																																		
3.0	39.0																																																		
MAD = 13.80																																																			

Por último, mediante el programa RENDATE (Lanos, 2004) se comparó la dirección obtenida con la curva maestra de variación secular (Soler et al., 2006, ampliada), corregida con las coordenadas del sitio. En las Tablas 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, se muestran las gráficas de inclinación, declinación y combinada con los diferentes intervalos en tiempo, así como los intervalos de tiempo producto de la intersección del valor medio obtenido en los cálculos previos con la curva de variación secular, para las muestras CQ E1; CQ E2; CQ E3; CE E1; CE E2 y PC, respectivamente.

Tabla 6.6: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra CQ E1. Intervalos de tiempo obtenidos.

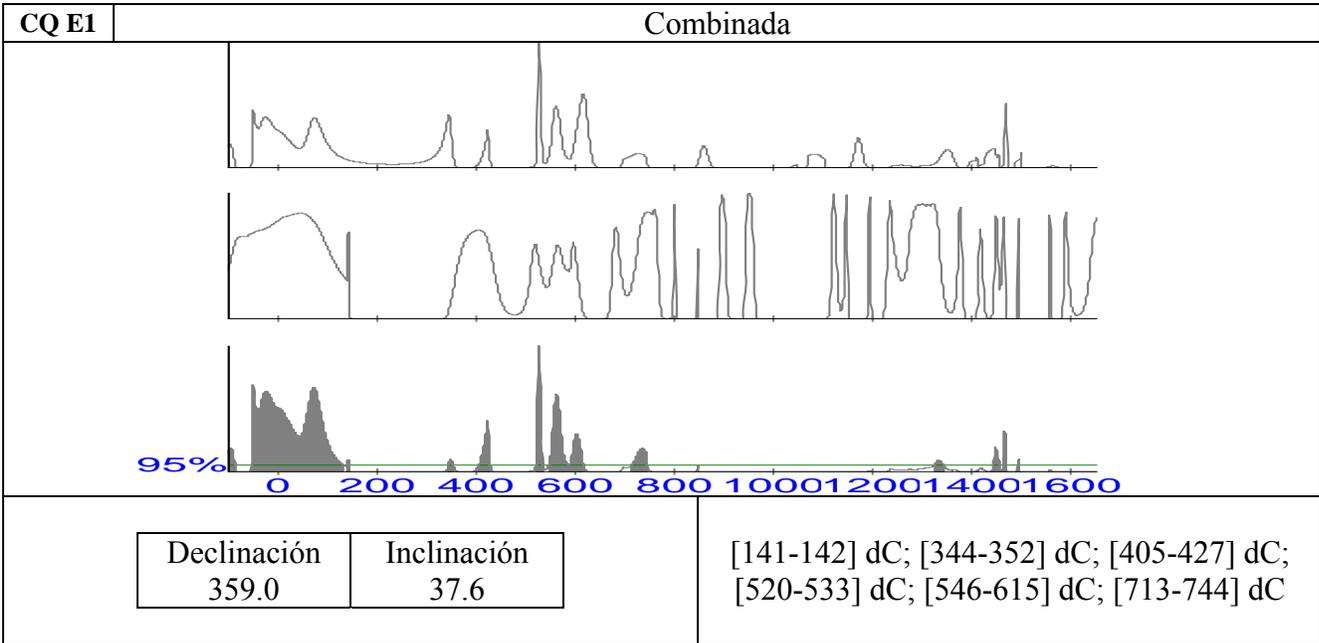


Tabla 6.7: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra CQ E2. Intervalos de tiempo obtenidos.

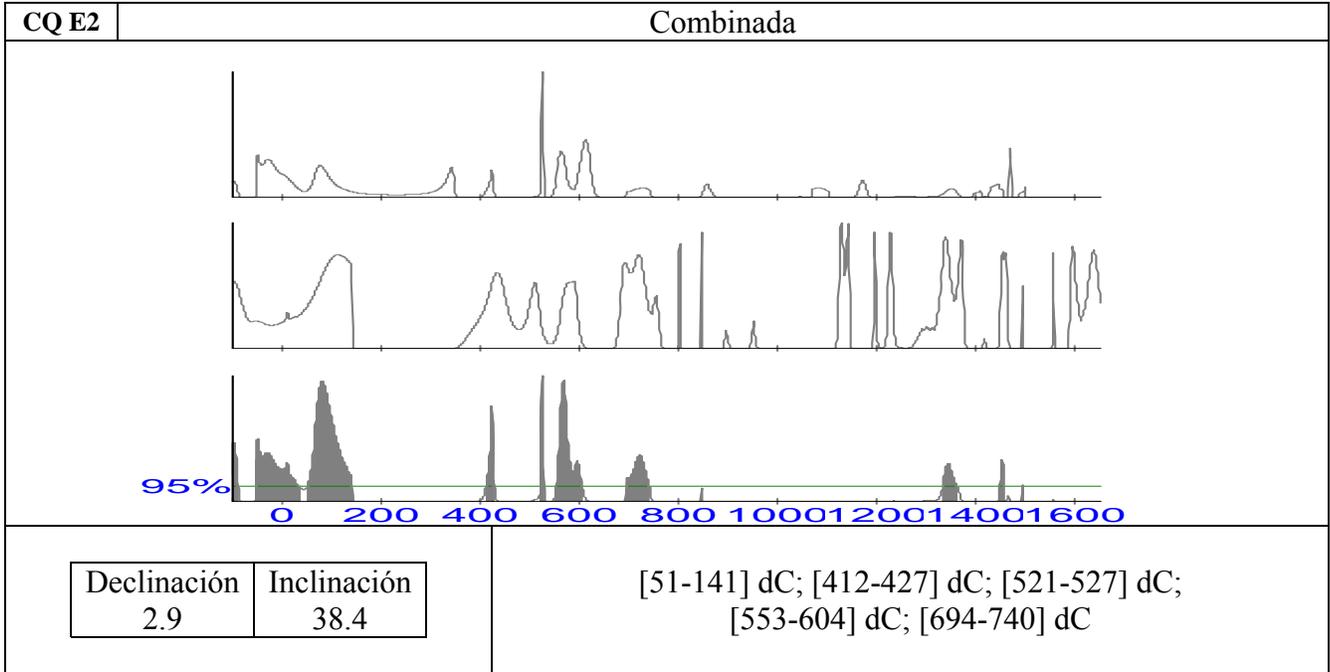


Tabla 6.8: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra CQ E3. Intervalos de tiempo obtenidos.

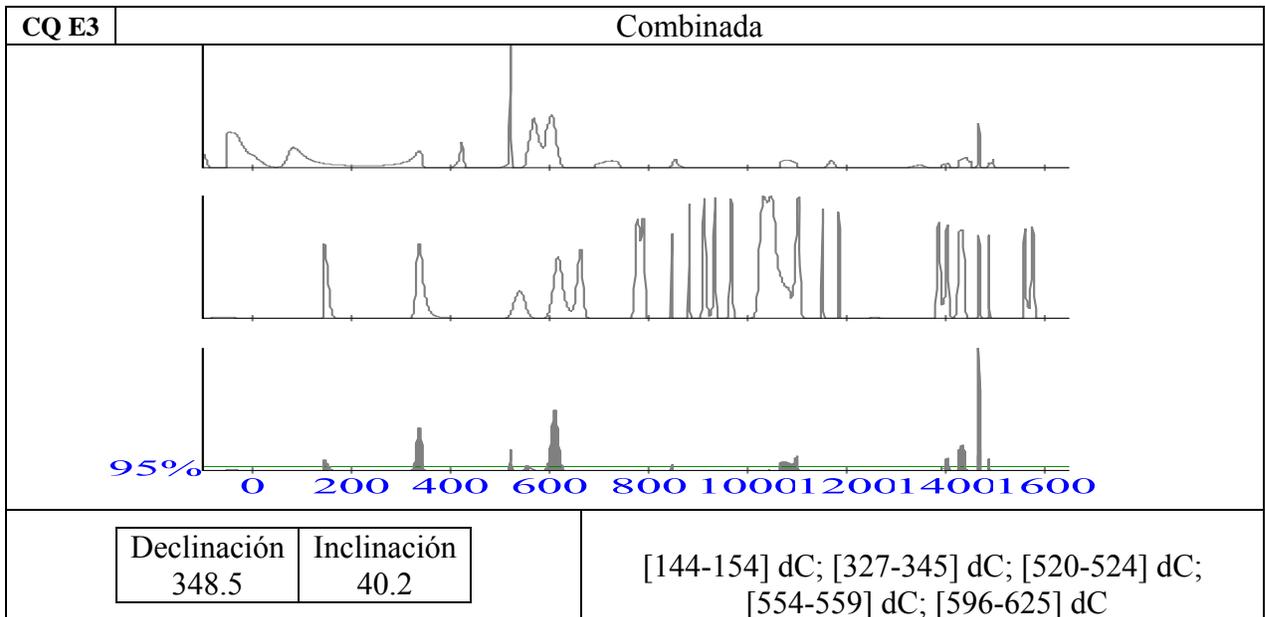


Tabla 6.9: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra CE E1. Intervalos de tiempo obtenidos.

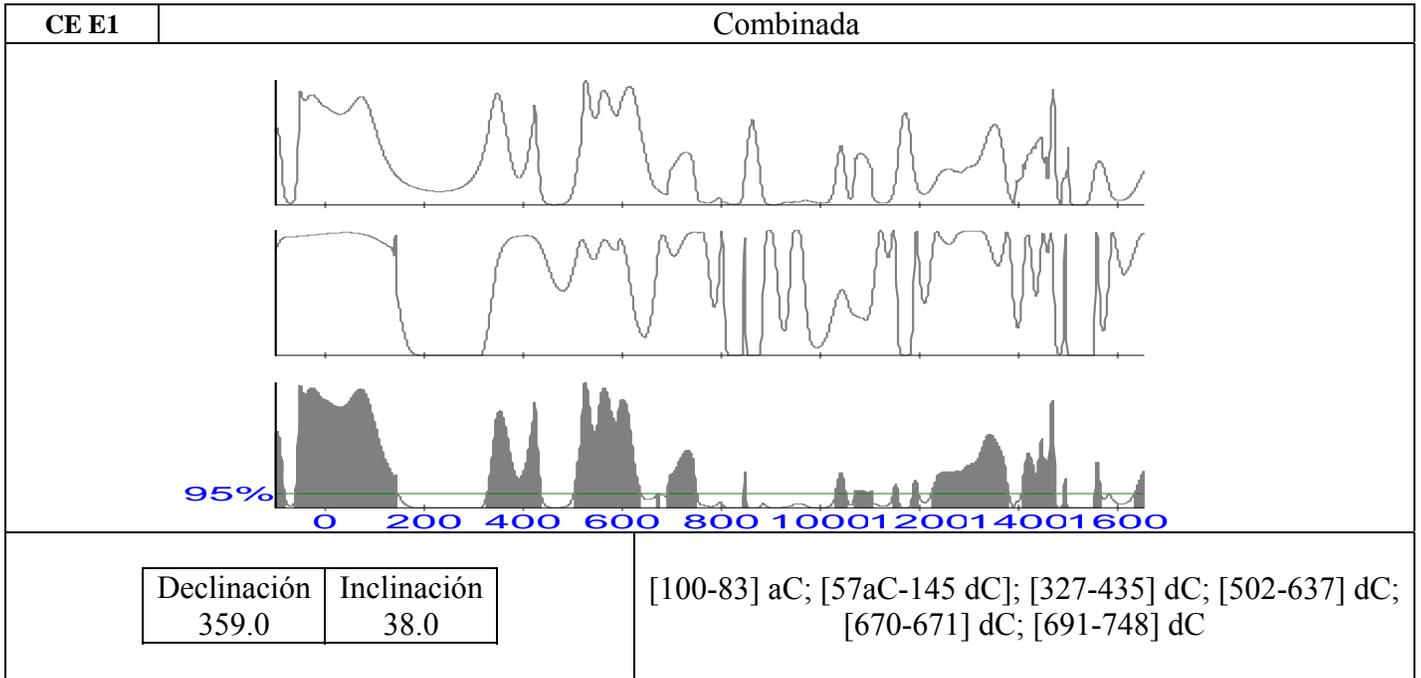


Tabla 6.10: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra CE E2. Intervalos de tiempo obtenidos.

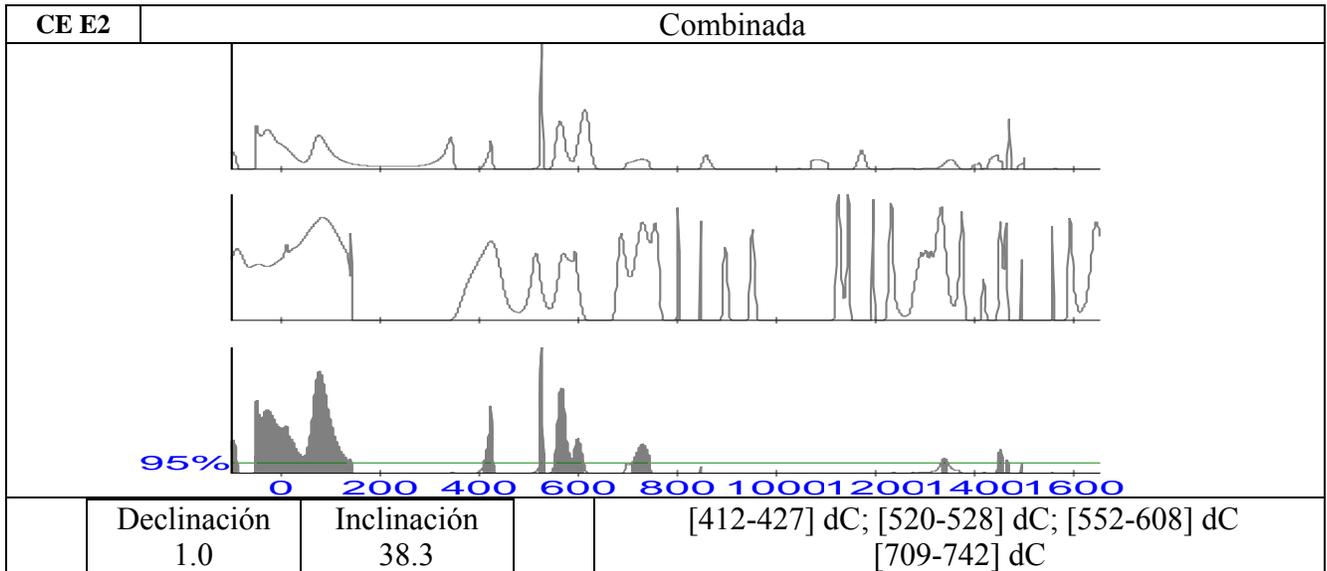
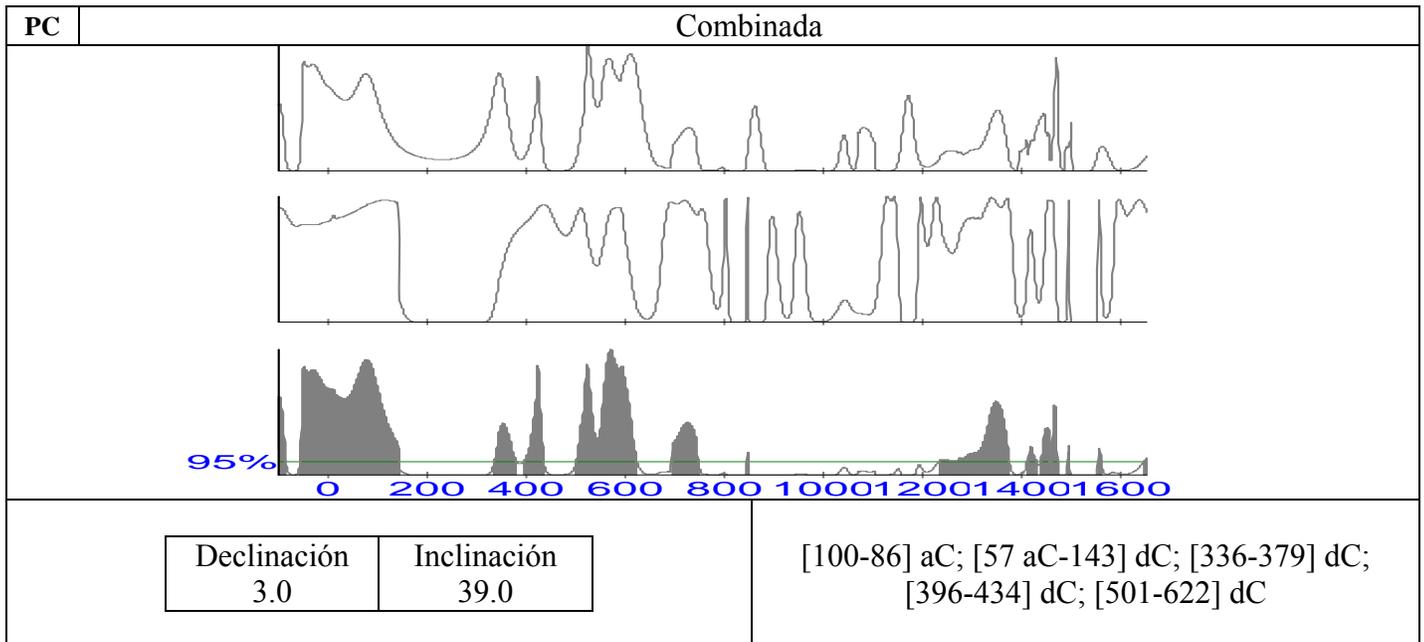


Tabla 6.11: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra PC. Intervalos de tiempo obtenidos.



## 6.2 Xalasco (Tlaxcala)

### 6.2.1 Recolección de las muestras

Se extrajeron 5 muestras en Xalasco, Tlaxcala: Xal 3, Xal 4, Xal 5, Xal 6 y Xal 7; tomadas el 9 de diciembre de 2008 por el grupo de arqueomagnetismo del Instituto de Geofísica de la UNAM (IGeofcu). De las cuales se obtuvieron 49 especímenes. Los especímenes, al igual que los obtenidos en La Ciudadela de Teotihuacan, son cilindros de 2.54 cm de diámetro y 2.10 cm de alto. Para lograr dichos cilindros, al material arqueológico se adherieron testigos de madera, usando resina epóxica libre de elementos magnéticos; estos especímenes fueron orientados con una brújula *in situ*, para su procesamiento en el laboratorio.

Las muestras obtenidas en el sitio arqueológico de Xalasco (Tlaxcala) y procesadas en este estudio se condensan en la tabla 6.12.

Tabla 6.12: Muestras y especímenes obtenidas en Xalasco en diciembre de 2008.

Muestra		Especímenes
XAL	3	[Xal 3A-Xal 3K]
	4	[Xal 4A-Xal 4O]
	5	[Xal 5A-Xal 5M]
	6	[Xal 6A,Xal 6B]
	7	[Xal 7A-Xal 7I]

**6.2.2 Localización de las muestras**



Imagen 6.10 Muestra Xal 3



Imagen 6.11 Muestra Xal 4



Imagen 6.12 Muestra Xal 4



Imagen 6.13 Muestra Xal 5



Imagen 6.14 Muestra Xal 6



Imagen 6.15 Muestra Xal 7



Imagen 6.16 Muestra Xal 7

### 6.2.3 Preparación y procesamiento de las muestras

En el laboratorio: 1) se realizó un lavado magnético con campos alternos crecientes, con un desmagnetizador de marca MOLSPIN, 2) se usó un magnetómetro AGICO JR6 para las lecturas de magnetización remanente; los dos pasos anteriores con el fin de encontrar la dirección característica de campo magnético que es la de nuestro interés.

Para determinar la longitud de los pasos de desmagnetización con los que se trabajará en el lavado magnético, primero se obtiene la magnetización natural remanente o NRM (por sus siglas en inglés), y se eligen especímenes denominados piloto, a los cuales se les hace el lavado con intervalos de valor de campo de 5 mT, en el intervalo total [5-100] mT, según el comportamiento de dichos especímenes piloto se eligen los pasos a seguir para el resto de la muestra.

Las hipótesis que se plantean durante este estudio son: i) en el caso de muestras quemadas existe una magnetización termo-remanente o adquirida por exposición al fuego y ii) en el caso de muestras no quemadas existe una magnetización detrítica al momento de fraguarse el estuco.

Con el fin de evitar magnetizaciones espurias, el magnetómetro se encuentra dentro de un blindaje magnético que elimina el campo magnético actual.

Para los especímenes de las muestras Xal 3 y Xal 6, se obtuvo un comportamiento en los diagramas de Zijdeveld con dos tendencias y, por consecuencia, tendencia a un plano en la proyección estereográfica. En este caso se usó ajuste de planos para obtener dirección característica o principal. Para Xal 6 sólo se contaba con dos especímenes.

En los especímenes de la muestra Xal 4. Se obtuvieron 2 tipos de comportamientos en los especímenes de esta muestra. El primero en donde las gráficas de desmagnetización son decrecientes, los diagramas de Zijdeveld son colineales, y las proyecciones estereográficas son agrupadas. Cuando se presentó este comportamiento

se ajustó una recta que tiende al origen en el diagrama de Zijderveld para obtener dirección característica de cada espécimen. El segundo caso fue un comportamiento en los diagramas de Zijderveld con dos tendencias y, por consecuencia, un plano en la proyección estereográfica. En este segundo caso se usó ajuste de planos para obtener dirección característica o principal.

Para los especímenes de las muestras Xal 5 y Xal 7, se obtuvo un comportamiento en donde las gráficas de desmagnetización son decrecientes, los diagramas de Zijderveld son colineales, y agrupamiento en las proyecciones estereográficas. En este comportamiento se ajustó una recta que tiende al origen en el diagrama de Zijderveld para obtener dirección característica de cada espécimen.

En la tabla 6.13 se muestra de manera condensada las gráficas de desmagnetización, los diagramas de Zijderveld y los estereogramas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes de las muestras Xal 3, Xal 4, Xal 5, Xal 6 y Xal 7, obtenidas en el sitio arqueológico de Xalasco.

Tabla 6.13 gráficas de desmagnetización, diagramas de Zijderveld y proyecciones estereográficas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes de las muestras Xal 3, Xal 4, Xal 5, Xal 6 y Xal 7, obtenidas en el sitio arqueológico de Xalasco, Tlaxcala.

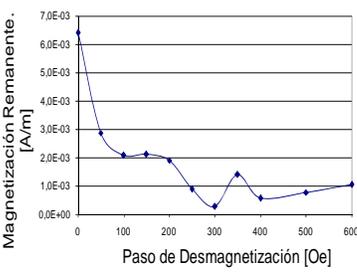
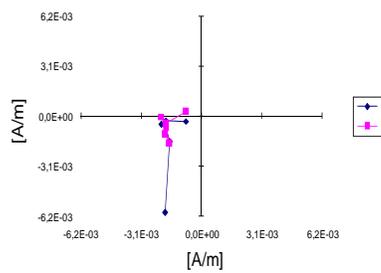
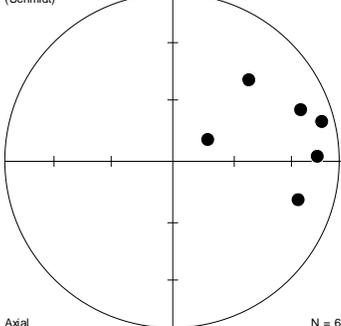
	Gráfica de Desmagnetización	Diagramas de Zijderveld	Proyecciones estereográficas
<b>Xal 3</b>	<p>Desmagnetización Espécimen XAL3B</p> 	<p>Diagrama de Zijderveld; Espécimen XAL3B</p> 	<p>(Schmidt)</p> 

Tabla 6.13 gráficas de desmagnetización, diagramas de Zijdeveld y proyecciones estereográficas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes de las muestras Xal 3, Xal 4, Xal 5, Xal 6 y Xal 7, obtenidas en el sitio arqueológico de Xalasco, Tlaxcala.

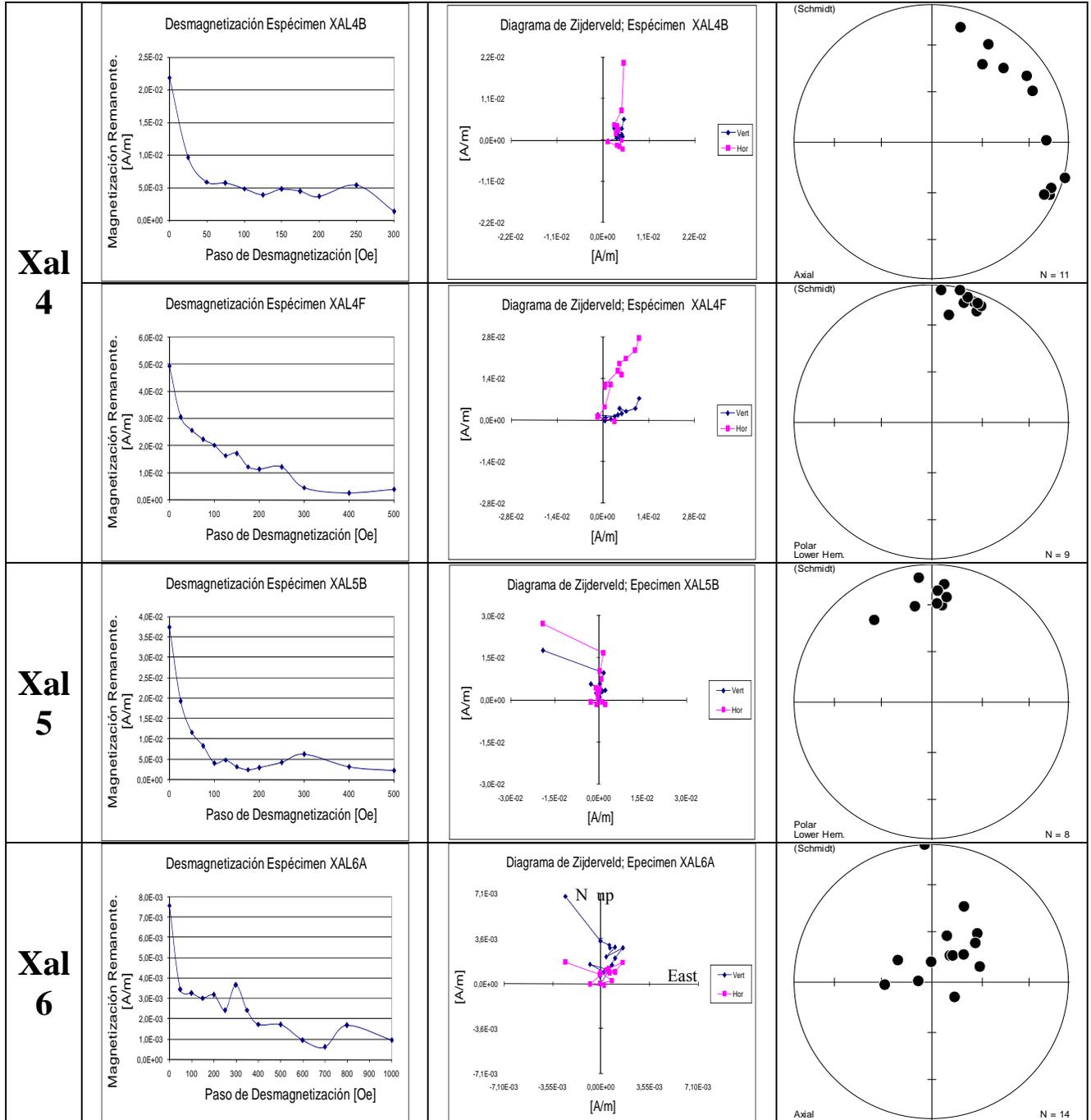
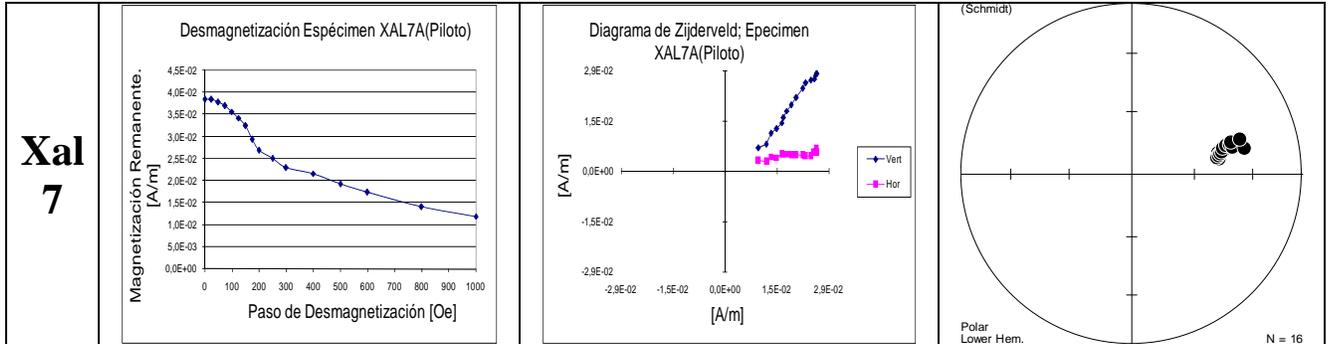


Tabla 6.13 gráficas de desmagnetización, diagramas de Zijderveld y proyecciones estereográficas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes de las muestras Xal 3, Xal 4, Xal 5, Xal 6 y Xal 7, obtenidas en el sitio arqueológico de Xalasco, Tlaxcala.



Para obtener la dirección media para cada muestra se empleó:

1) La estadística Fisher que además de darnos una dirección media, también provee datos de declinación e inclinación y los parámetros estadísticos  $\alpha_{95}$  (cuyos valores deben ser menores a 10). También proporciona un parámetro de agrupamiento o  $k$ , que a mayor valor indica un mayor agrupamiento y por ultimo un parámetro  $R$  que debe ser muy cercano al número de muestras.

2) Ajuste de planos: en el cual se ajusta o aproxima el mejor plano a los datos obtenidos, de este plano ajustado se obtiene el polo, que será el dato de declinación e inclinación que se busca, en este caso el parámetro de confianza es **MAD** que es el ángulo de desviación de la dirección del polo del plano.

En la tabla 6.14 se muestran las proyecciones estereográficas de las muestras Xal 3, Xal 4, Xal 5, y Xal 7, con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media, así como los especímenes que intervinieron en los cálculos, los resultados de dichos cálculos con la corrección de deriva al oeste.

Tabla 6.14 Proyecciones estereográficas de las muestras Xal 3, Xal 4, Xal 5, y Xal 7, con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media. Especímenes que intervinieron en los cálculos. Resultados de dichos cálculos

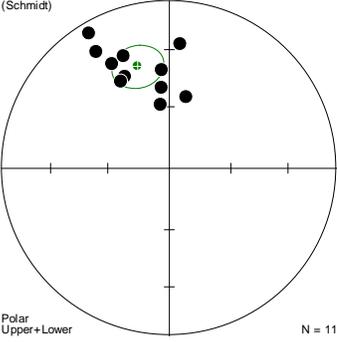
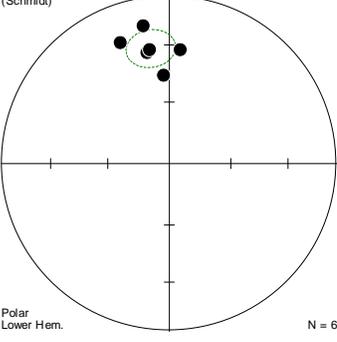
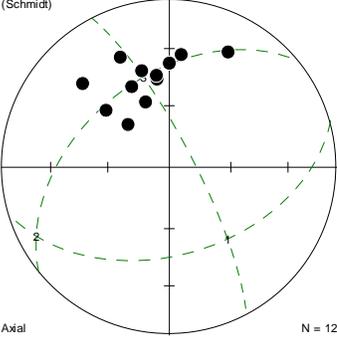
<p>Xalasco Muestra 3 Xal 3</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>XAL 3A</td><td>331</td><td>30</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3B</td><td>338</td><td>28</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3C</td><td>13</td><td>54</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3D</td><td>5</td><td>26</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3E</td><td>329</td><td>7</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3F</td><td>354</td><td>50</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3G</td><td>334</td><td>39</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3H</td><td>331</td><td>40</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3I</td><td>352</td><td>58</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3J</td><td>355</td><td>41</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 3K</td><td>328</td><td>19</td><td>Plano</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	XAL 3A	331	30	Plano	XAL 3B	338	28	Plano	XAL 3C	13	54	Plano	XAL 3D	5	26	Plano	XAL 3E	329	7	Plano	XAL 3F	354	50	Plano	XAL 3G	334	39	Plano	XAL 3H	331	40	Plano	XAL 3I	352	58	Plano	XAL 3J	355	41	Plano	XAL 3K	328	19	Plano	<p>Piso no quemado. Por la distribución de tendencia puntual de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de estadística Fisher, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Declinación</th> <th colspan="2">Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">350.7</td> <td colspan="2">37.6</td> </tr> <tr> <td><math>\alpha_{95}</math></td> <td>k</td> <td>R</td> <td></td> </tr> <tr> <td>9.1</td> <td>16.81</td> <td>10.4</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Declinación		Inclinación		350.7		37.6		$\alpha_{95}$	k	R		9.1	16.81	10.4	
Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																																																
XAL 3A	331	30	Plano																																																																
XAL 3B	338	28	Plano																																																																
XAL 3C	13	54	Plano																																																																
XAL 3D	5	26	Plano																																																																
XAL 3E	329	7	Plano																																																																
XAL 3F	354	50	Plano																																																																
XAL 3G	334	39	Plano																																																																
XAL 3H	331	40	Plano																																																																
XAL 3I	352	58	Plano																																																																
XAL 3J	355	41	Plano																																																																
XAL 3K	328	19	Plano																																																																
Declinación		Inclinación																																																																	
350.7		37.6																																																																	
$\alpha_{95}$	k	R																																																																	
9.1	16.81	10.4																																																																	
<p>Xalasco Muestra 4 Xal 4</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>XAL 4A</td><td>349</td><td>18</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 4E</td><td>356</td><td>46</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 4H</td><td>349</td><td>33</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 4J</td><td>338</td><td>23</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>XAL 4M</td><td>350</td><td>32</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>XAL 4N</td><td>5</td><td>32</td><td>Línea</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	XAL 4A	349	18	Plano	XAL 4E	356	46	Plano	XAL 4H	349	33	Plano	XAL 4J	338	23	Línea	XAL 4M	350	32	Línea	XAL 4N	5	32	Línea	<p>Piso no quemado. Por la distribución de tendencia puntual de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de estadística Fisher, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Declinación</th> <th colspan="2">Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">358.8</td> <td colspan="2">32.0</td> </tr> <tr> <td><math>\alpha_{95}</math></td> <td>k</td> <td>R</td> <td></td> </tr> <tr> <td>8.2</td> <td>41.99</td> <td>5.88</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Declinación		Inclinación		358.8		32.0		$\alpha_{95}$	k	R		8.2	41.99	5.88																					
Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																																																
XAL 4A	349	18	Plano																																																																
XAL 4E	356	46	Plano																																																																
XAL 4H	349	33	Plano																																																																
XAL 4J	338	23	Línea																																																																
XAL 4M	350	32	Línea																																																																
XAL 4N	5	32	Línea																																																																
Declinación		Inclinación																																																																	
358.8		32.0																																																																	
$\alpha_{95}$	k	R																																																																	
8.2	41.99	5.88																																																																	
<p>Xalasco Muestra 5 Xal 5</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>XAL 5A</td><td>360</td><td>38</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>XAL 5B</td><td>336</td><td>29</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>XAL 5D</td><td>344</td><td>40</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>XAL 5E</td><td>27</td><td>24</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 5F</td><td>352</td><td>46</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 5G</td><td>340</td><td>56</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 5H</td><td>335</td><td>46</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 5I</td><td>6</td><td>33</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>XAL 5J</td><td>316</td><td>61</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>XAL 5K</td><td>312</td><td>48</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>XAL 5L</td><td>352</td><td>44</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>XAL 5M</td><td>314</td><td>29</td><td>Plano</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	XAL 5A	360	38	Línea	XAL 5B	336	29	Línea	XAL 5D	344	40	Línea	XAL 5E	27	24	Plano	XAL 5F	352	46	Plano	XAL 5G	340	56	Plano	XAL 5H	335	46	Plano	XAL 5I	6	33	Línea	XAL 5J	316	61	Línea	XAL 5K	312	48	Plano	XAL 5L	352	44	Línea	XAL 5M	314	29	Plano	<p>Piso no quemado. Por la distribución en un plano de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de ajuste de plano, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Declinación</th> <th colspan="2">Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">352.6</td> <td colspan="2">44.2</td> </tr> <tr> <td colspan="4">MAD = 9.60</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación		Inclinación		352.6		44.2		MAD = 9.60			
Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																																																
XAL 5A	360	38	Línea																																																																
XAL 5B	336	29	Línea																																																																
XAL 5D	344	40	Línea																																																																
XAL 5E	27	24	Plano																																																																
XAL 5F	352	46	Plano																																																																
XAL 5G	340	56	Plano																																																																
XAL 5H	335	46	Plano																																																																
XAL 5I	6	33	Línea																																																																
XAL 5J	316	61	Línea																																																																
XAL 5K	312	48	Plano																																																																
XAL 5L	352	44	Línea																																																																
XAL 5M	314	29	Plano																																																																
Declinación		Inclinación																																																																	
352.6		44.2																																																																	
MAD = 9.60																																																																			

Tabla 6.14 Proyecciones estereográficas de las muestras Xal 3, Xal 4, Xal 5, y Xal 7, con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media. Especímenes que intervinieron en los cálculos. Resultados de dichos cálculos

Xalasco Muestra 7 Xal 7		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>XAL 7A</td> <td>321</td> <td>50</td> <td>Plano</td> </tr> <tr> <td>XAL 7B</td> <td>350</td> <td>39</td> <td>Plano</td> </tr> <tr> <td>XAL 7C</td> <td>332</td> <td>32</td> <td>Plano</td> </tr> <tr> <td>XAL 7D</td> <td>332</td> <td>14</td> <td>Plano</td> </tr> <tr> <td>XAL 7E</td> <td>320</td> <td>12</td> <td>Plano</td> </tr> <tr> <td>XAL 7F</td> <td>331</td> <td>18</td> <td>Plano</td> </tr> <tr> <td>XAL 7H</td> <td>352</td> <td>17</td> <td>Plano</td> </tr> <tr> <td>XAL 7I</td> <td>330</td> <td>41</td> <td>Plano</td> </tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	XAL 7A	321	50	Plano	XAL 7B	350	39	Plano	XAL 7C	332	32	Plano	XAL 7D	332	14	Plano	XAL 7E	320	12	Plano	XAL 7F	331	18	Plano	XAL 7H	352	17	Plano	XAL 7I	330	41	Plano	<p>Piso quemado. Por la distribución de tendencia puntual de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de estadística Fisher, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Declinación</th> <th colspan="2">Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">341.3</td> <td colspan="2">37.6</td> </tr> <tr> <td><math>\alpha_{95}</math></td> <td>k</td> <td>R</td> <td></td> </tr> <tr> <td>9.6</td> <td>21.29</td> <td>7.67</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Declinación		Inclinación		341.3		37.6		$\alpha_{95}$	k	R		9.6	21.29	7.67	
		Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																																		
		XAL 7A	321	50	Plano																																																		
		XAL 7B	350	39	Plano																																																		
		XAL 7C	332	32	Plano																																																		
		XAL 7D	332	14	Plano																																																		
		XAL 7E	320	12	Plano																																																		
		XAL 7F	331	18	Plano																																																		
XAL 7H	352	17	Plano																																																				
XAL 7I	330	41	Plano																																																				
Declinación		Inclinación																																																					
341.3		37.6																																																					
$\alpha_{95}$	k	R																																																					
9.6	21.29	7.67																																																					

Para obtener las fechas probables se empleó el programa RENDATE (Lanos, 2004). Se comparó la dirección obtenida con la curva maestra de variación secular (Soler *et al.*, 2006) corregida con las coordenadas del sitio. El programa RENDATE se basa en estadística bayesiana para encontrar las fechas con mayor probabilidad.

En las tablas 6.15, 6.16, 6.17 y 6.18 se presentan las gráficas de la declinación y de la inclinación intersecadas con las curvas de referencia respectivas así como la combinación de las intersecciones y los intervalos de tiempo resultados de dichas intersecciones, de las muestras Xal 3, Xal 4, Xal 5 y Xal 7.

Tabla 6.15: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra Xal 3., intervalos de tiempo producto de la intersección.

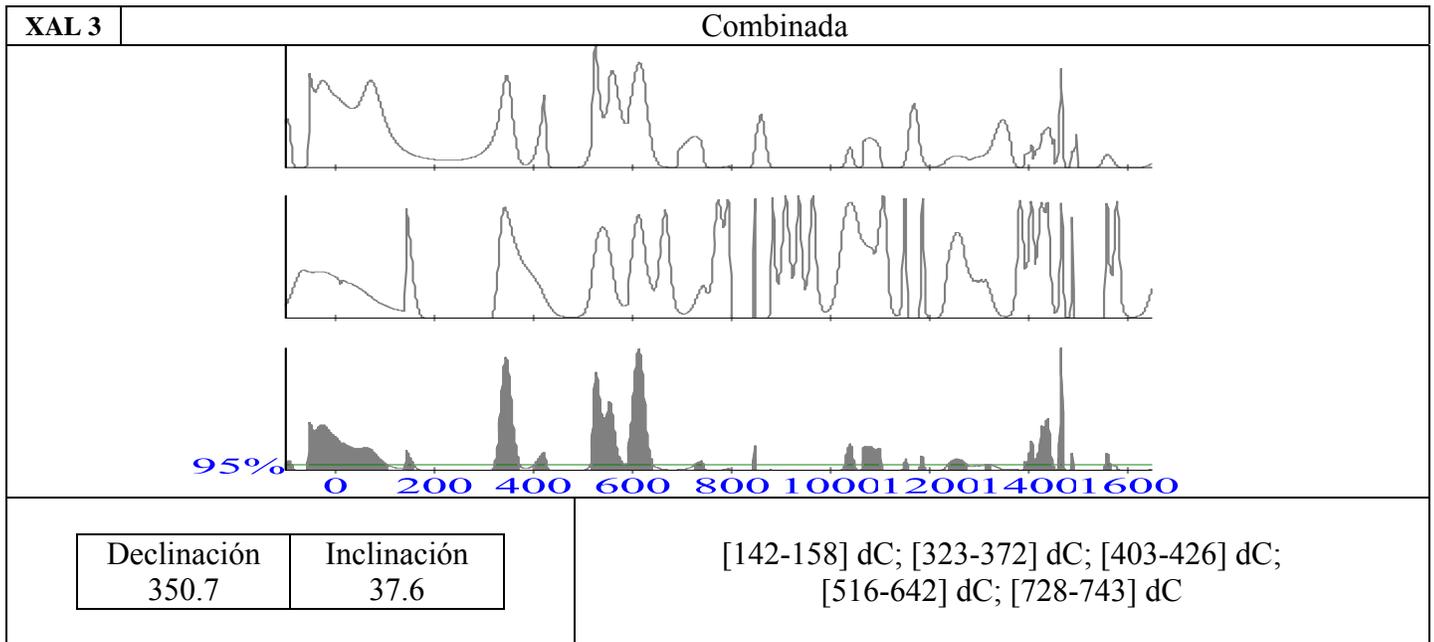


Tabla 6.16: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra Xal 4., intervalos de tiempo producto de la intersección.

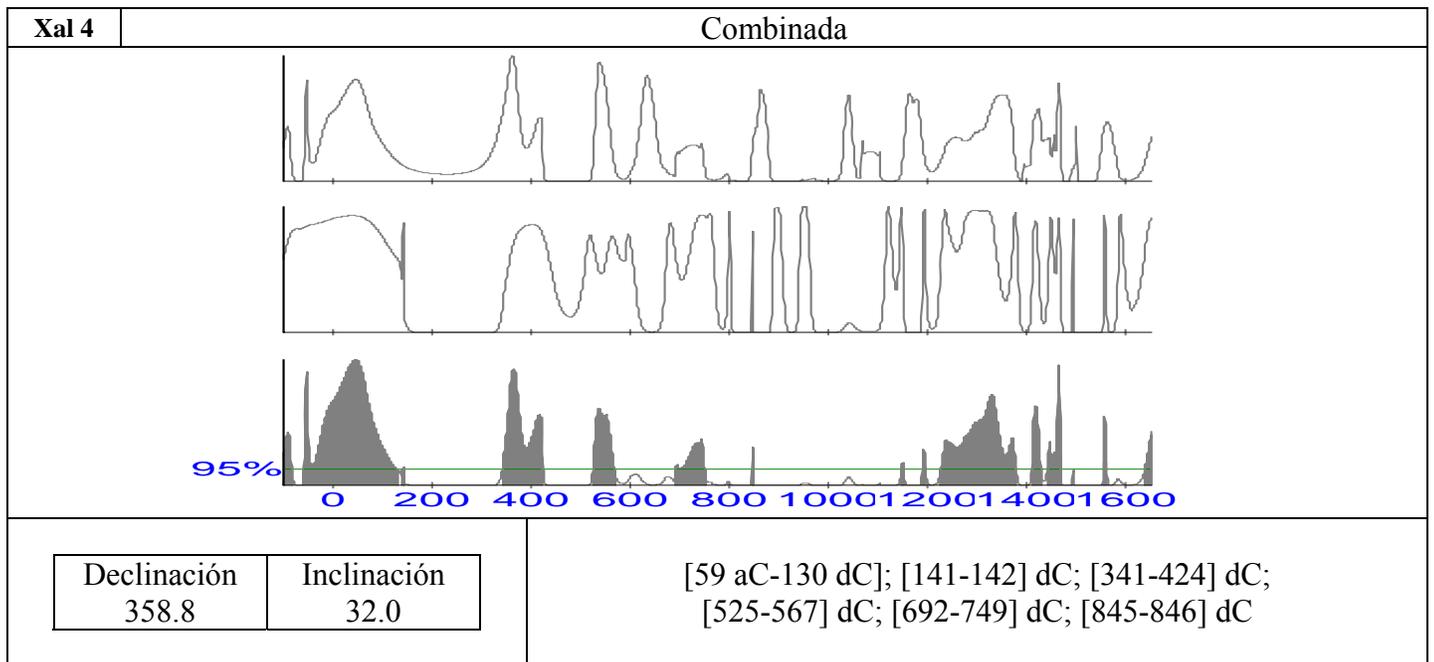


Tabla 6.17: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra Xal 5., intervalos de tiempo producto de la intersección.

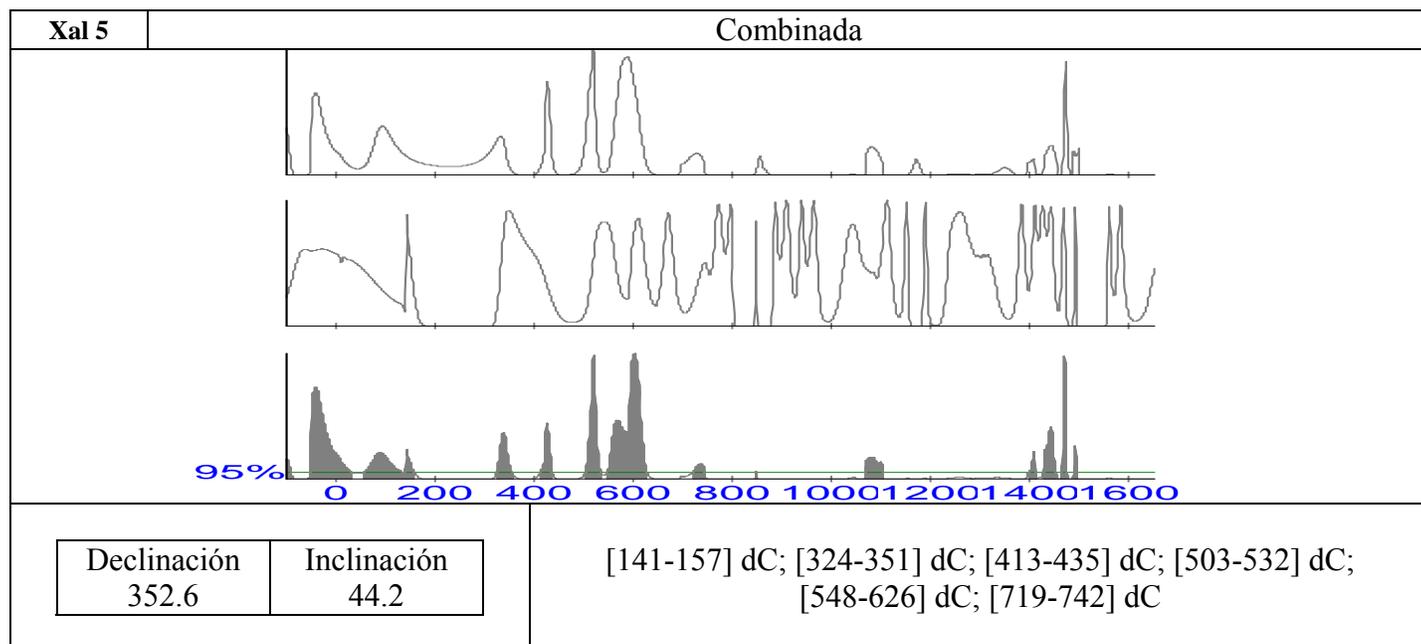
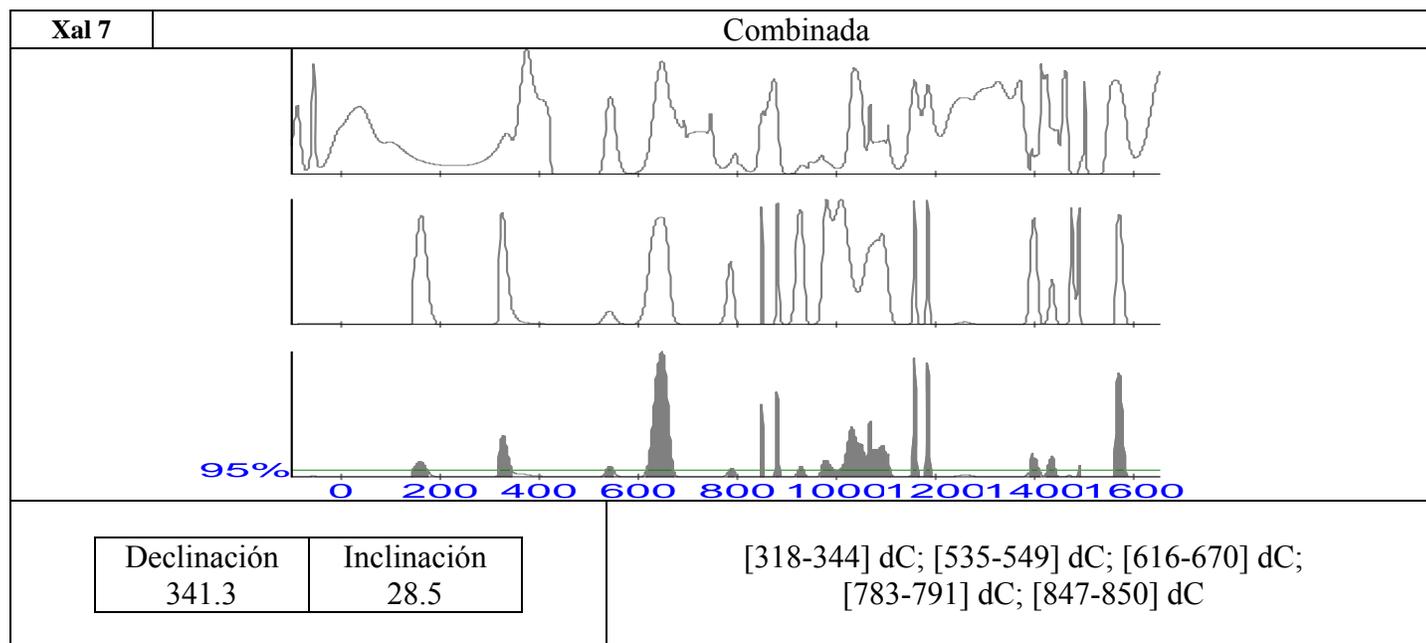


Tabla 6.18: Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra Xal 7., intervalos de tiempo producto de la intersección.



### 6.3 Sierra de las Navajas, Hidalgo

#### 6.3.1 Recolección de las muestras

Se extrajeron 4 muestras en el sitio arqueológico Sierra de las Navajas, Hidalgo (SN: E1, E2, E3, E4) en diciembre de 2005. Dicha recolección fue realizada por el grupo de Arqueomagnetismo del Instituto de Geofísica de la UNAM (IGeofcu). De estas muestras se obtuvieron 34 especímenes. Los especímenes son cilindros de 2.54 cm de diámetro y 2.1 cm de alto. Al igual que en los otros dos sitios estudiados en esta investigación se adhirieron al material arqueológico testigos de madera cilíndricos de 2.54 cm de diámetros y 5 mm de espesor para lograr el tamaño adecuado de los especímenes. Para tal fin se usó resina epóxica libre de elementos magnéticos. Los especímenes fueron orientados con una brújula magnética *in situ* para su procesado en el laboratorio.

Tabla 6.19 se enlistan las muestras recolectadas en el sitio arqueológico Sierra de las Navajas, Hidalgo, y el número de especímenes obtenidos para cada una de ellas.

<b>Muestra</b>		<b>Especímenes</b>
<b>SN</b>	<b>E1</b>	<b>[sn1-sn9]</b>
	<b>E2</b>	<b>[sn10-sn17]</b>
	<b>E3</b>	<b>[sn20-sn27]</b>
	<b>E4</b>	<b>[sn29-sn36]</b>

### 6.3.2 Localización de las muestras



Imagen 6.16: Muestra SN E1. Especímenes de Sn 1 a Sn 9.



Imagen 6.17: Muestra SN E2. Especímenes de Sn 10 a Sn 17, indicados por la flecha amarilla. En la foto el Dr. Sterpone se encuentra orientando uno de los especímenes.



Imagen 6.18: Muestra SN E3. Especímenes de Sn 20 a Sn 27.



Imagen 6.19 Muestra SN E4: especímenes de Sn 28 a Sn 36 (en la parte izquierda de la fotografía). Muestra SN E3: especímenes de Sn 20 a Sn 27 (en la parte derecha de la fotografía).

### 6.3.3 Preparación y procesamiento de las muestras

En el laboratorio: 1) se realizó un lavado magnético con campos alternos crecientes, con un desmagnetizador de marca MOLSPIN y 2) se usó un magnetómetro JR6 para las lecturas de magnetización remanente; los dos pasos anteriores con el fin de encontrar la dirección característica del campo magnético, que es la de nuestro interés.

Para determinar la longitud de los pasos de desmagnetización con los que se trabajará en el lavado magnético, primero se obtiene la magnetización natural remanente o NRM (por sus siglas en inglés), y se eligen especímenes denominados piloto, a los cuales se les hace el lavado con intervalos de valor de campo de 5 mT, en el intervalo total [5-100] mT, según el comportamiento de dichos especímenes piloto se eligen los pasos a seguir para el resto de la muestra.

La hipótesis que se plantean durante este estudio es que en el caso de muestras quemadas existe una magnetización termo-remanente adquirida por exposición al fuego, la cual tuvo lugar durante la última quema o el último uso.

Con el fin de evitar magnetizaciones espurias, el magnetómetro se encuentra dentro de un blindaje magnético que elimina el campo magnético actual.

En los especímenes de las muestras SN E1, SN E2, y SN E3. Se obtuvieron 2 tipos de comportamientos en los especímenes de ésta muestra; el primero en donde las gráficas de desmagnetización son decrecientes, los diagramas de Zijdeveld son colineales y las proyecciones estereográficas de cada paso son agrupadas. Cuando se presentó este comportamiento se ajustó una recta que tiende al origen en el diagrama de Zijdeveld para obtener dirección característica de cada espécimen.

El segundo caso fue un comportamiento en los diagramas de Zijdeveld con dos tendencias y, por consecuencia,

un plano en la proyección estereográfica. En este caso se usó ajuste de planos para obtener dirección característica o principal. Para obtener el vector de interés, se analizan los vectores propios que resultan del ajuste de plano, y se elige la dirección correspondiente al valor propio máximo.

Para los especímenes de la muestra SN E4, se obtuvo un comportamiento en los diagramas de Zijderveld con dos tendencias y, por consecuencia, tendencia a un plano en la proyección estereográfica. En este caso se usó ajuste de planos para obtener dirección característica o principal.

En la Tabla 6.20 se muestra de manera condensada las gráficas de desmagnetización, los diagramas de Zijderveld y las proyecciones estereográficas de los comportamientos típicos o representativos de los grupos de especímenes de las muestras SN: E1, E2, E3, E4, obtenidas en el sitio arqueológico de Xalasco.

Tabla 6.20 Diagramas de Zijderveld, proyecciones estereográficas, así como las gráficas de desmagnetización de los comportamientos típicos o representativos de las muestras SN: E1, E2, E3, E4, obtenidas en el sitio arqueológico Sierra de las Navajas, Hidalgo

	Gráfica de Desmagnetización	Diagramas de Zijderveld	Proyecciones Estereográficas
<b>SN E1</b>	<p>Desmagnetización Espécimen SN3</p>	<p>Diagrama de Zijderveld; Espécimen SN3</p>	<p>(Schmidt)</p> <p>Polar Lower Hem. N = 8</p>
	<p>Desmagnetización Espécimen SN5</p>	<p>Diagrama de Zijderveld; Espécimen SN5</p>	<p>(Schmidt)</p> <p>Axial N = 8</p>

Tabla 6.20 Diagramas de Zijdeveld, proyecciones estereográficas, así como las gráficas de desmagnetización de los comportamientos típicos o representativos de las muestras SN: E1, E2, E3, E4, obtenidas en el sitio arqueológico Sierra de las Navajas, Hidalgo

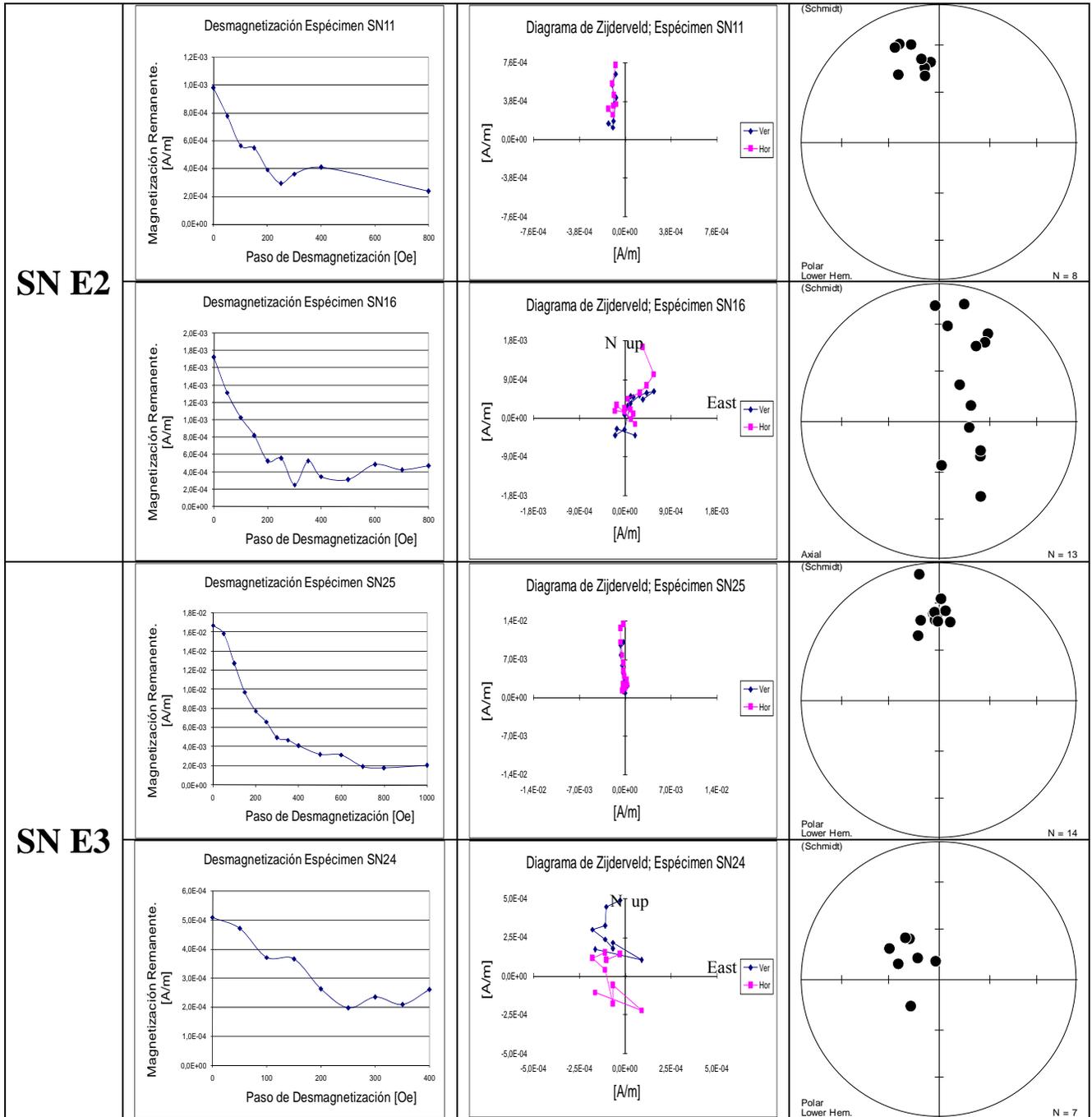
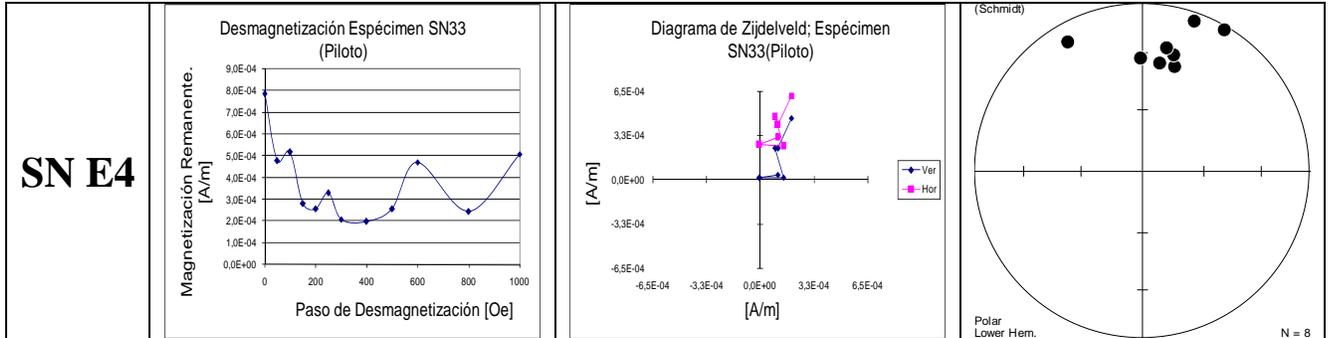


Tabla 6.20 Diagramas de Zijderveld, proyecciones estereográficas, así como las gráficas de desmagnetización de los comportamientos típicos o representativos de las muestras SN: E1, E2, E3, E4, obtenidas en el sitio arqueológico Sierra de las Navajas, Hidalgo



Para obtener la dirección media para cada muestra se empleó la estadística Fisher o distribución normal sobre la superficie de una esfera, cuando las proyecciones estereográficas son agrupadas, esta estadística nos provee de una dirección media, declinación e inclinación y los parámetros estadísticos  $\alpha_{95}$ . Los valores aceptados de  $\alpha_{95}$  son menores a  $10^\circ$ . También proporciona un parámetro de agrupamiento o k, que entre mayor sea indica un mayor agrupamiento y, por último, un parámetro R que debe ser muy cercano al número de muestras. Si en la proyección estereográfica se tiene una distribución que tiende a un plano, se obtiene la dirección media ajustando un plano a los puntos, en este caso el parámetro estadístico de confianza es el ángulo de desviación máxima o MAD.

En las muestras SN E3 y SN E4 se obtuvo un comportamiento con dos tendencias, es decir, distribuciones con tendencia a un plano en la proyección estereográfica, sin embargo no fue posible obtener por separado direcciones medias que al ser intersecadas con la curva de variación secular, arrojaran intervalos de tiempo que se pudieran correlacionar con la información arqueológica del sitio, así entonces se unieron dichas muestras ya que correspondían al mismo fogón. EL resultado de la unión de SN E3 y SN E4, tuvo un comportamiento con

dos tendencias, es decir, distribución con tendencia a un plano en la proyección estereográfica, luego entonces, se uso ajuste de plano para obtener dirección característica o principal.

En la tabla 6.21 se muestran las proyecciones estereográficas de las muestras SN E1, SN E2, SN E3, y SN E4, con las que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media, así como los especímenes que intervinieron en los cálculos, y los resultados de dichos cálculos.

Tabla 6.21 Proyecciones estereográficas de las muestras SN E1, SN E2, SN E3, y SN E4 con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media. Especímenes que intervinieron en los cálculos. Resultados de dichos cálculos.

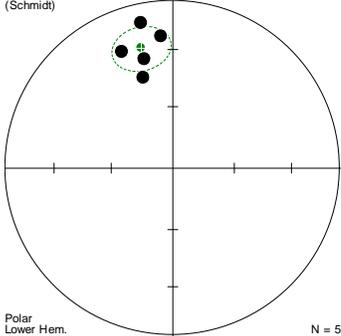
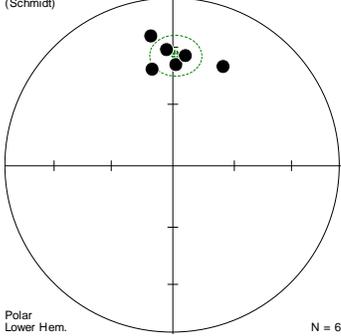
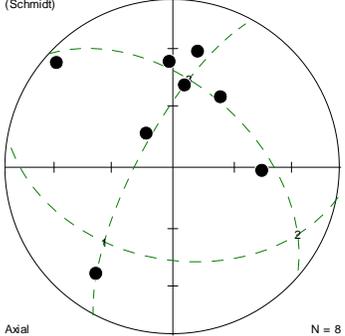
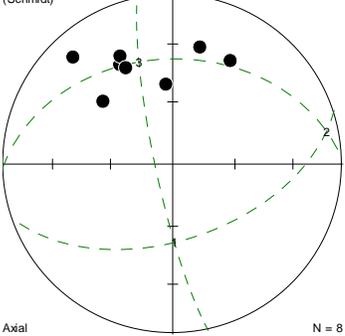
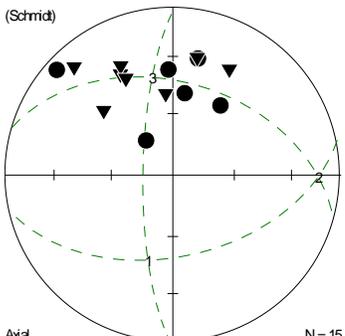
<p>Sierra de las Navajas Muestra 1 SN E1</p>	<p>(Schmidt)</p>  <p>Polar Lower Hem. N = 5</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SN 1</td> <td>345</td> <td>33</td> <td>Línea</td> </tr> <tr> <td>SN 4</td> <td>342</td> <td>42</td> <td>Plano</td> </tr> <tr> <td>SN 5</td> <td>336</td> <td>25</td> <td>Plano</td> </tr> <tr> <td>SN 6</td> <td>347</td> <td>5</td> <td>Línea</td> </tr> <tr> <td>SN 8</td> <td>355</td> <td>22</td> <td>Línea</td> </tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	SN 1	345	33	Línea	SN 4	342	42	Plano	SN 5	336	25	Plano	SN 6	347	5	Línea	SN 8	355	22	Línea	<p>Piso quemado, por la distribución con tendencia puntual de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de estadística Fisher, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Declinación</th> <th colspan="2">Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">353.3</td> <td colspan="2">27.0</td> </tr> <tr> <td><math>\alpha_{95}</math></td> <td>k</td> <td colspan="2">R</td> </tr> <tr> <td>9.6</td> <td>39.02</td> <td colspan="2">4.9</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación		Inclinación		353.3		27.0		$\alpha_{95}$	k	R		9.6	39.02	4.9					
Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																												
SN 1	345	33	Línea																																												
SN 4	342	42	Plano																																												
SN 5	336	25	Plano																																												
SN 6	347	5	Línea																																												
SN 8	355	22	Línea																																												
Declinación		Inclinación																																													
353.3		27.0																																													
$\alpha_{95}$	k	R																																													
9.6	39.02	4.9																																													
<p>Sierra de las Navajas Muestra 2 SN E2</p>	<p>(Schmidt)</p>  <p>Polar Lower Hem. N = 6</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SN 10</td> <td>357</td> <td>31</td> <td>Línea</td> </tr> <tr> <td>SN 11</td> <td>348</td> <td>41</td> <td>Línea</td> </tr> <tr> <td>SN 12</td> <td>2</td> <td>40</td> <td>Línea</td> </tr> <tr> <td>SN 13</td> <td>350</td> <td>23</td> <td>Línea</td> </tr> <tr> <td>SN 14</td> <td>7</td> <td>34</td> <td>Línea</td> </tr> <tr> <td>SN 16</td> <td>27</td> <td>34</td> <td>Línea</td> </tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	SN 10	357	31	Línea	SN 11	348	41	Línea	SN 12	2	40	Línea	SN 13	350	23	Línea	SN 14	7	34	Línea	SN 16	27	34	Línea	<p>Piso quemado, por la distribución con tendencia puntual de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de estadística Fisher, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Declinación</th> <th colspan="2">Inclinación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">9.6</td> <td colspan="2">34.4</td> </tr> <tr> <td><math>\alpha_{95}</math></td> <td>k</td> <td colspan="2">R</td> </tr> <tr> <td>8.7</td> <td>37.05</td> <td colspan="2">5.9</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación		Inclinación		9.6		34.4		$\alpha_{95}$	k	R		8.7	37.05	5.9	
Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																												
SN 10	357	31	Línea																																												
SN 11	348	41	Línea																																												
SN 12	2	40	Línea																																												
SN 13	350	23	Línea																																												
SN 14	7	34	Línea																																												
SN 16	27	34	Línea																																												
Declinación		Inclinación																																													
9.6		34.4																																													
$\alpha_{95}$	k	R																																													
8.7	37.05	5.9																																													

Tabla 6.21 Proyecciones estereográficas de las muestras SN E1, SN E2, SN E3, y SN E4 con la que se obtuvieron la declinación media y la inclinación media. Especímenes que intervinieron en los cálculos. Resultados de dichos cálculos.

<p>Sierra de las Navajas Muestra 3 SN E3</p>	<p>(Schmidt)</p>  <p>Axial N = 8</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>SN 20</td><td>34</td><td>48</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>SN 21</td><td>8</td><td>49</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>SN 22</td><td>216</td><td>23</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>SN 23</td><td>12</td><td>30</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>SN 24</td><td>322</td><td>69</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>SN 25</td><td>358</td><td>37</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>SN 26</td><td>92</td><td>46</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>SN 27</td><td>312</td><td>8</td><td>Plano</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	SN 20	34	48	Línea	SN 21	8	49	Línea	SN 22	216	23	Línea	SN 23	12	30	Línea	SN 24	322	69	Línea	SN 25	358	37	Línea	SN 26	92	46	Plano	SN 27	312	8	Plano	<p>Piso quemado</p>
Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																				
SN 20	34	48	Línea																																				
SN 21	8	49	Línea																																				
SN 22	216	23	Línea																																				
SN 23	12	30	Línea																																				
SN 24	322	69	Línea																																				
SN 25	358	37	Línea																																				
SN 26	92	46	Plano																																				
SN 27	312	8	Plano																																				
<p>Sierra de las Navajas Muestra 4 SN E4</p>	<p>(Schmidt)</p>  <p>Axial N = 8</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Especímenes usados para los cálculos</th> <th>Dec</th> <th>Inc</th> <th>Tipo de ajuste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>SN 29</td><td>29</td><td>31</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>SN 30</td><td>355</td><td>51</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>SN 31</td><td>332</td><td>34</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>SN 32</td><td>334</td><td>30</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>SN 33</td><td>12</td><td>31</td><td>Línea</td></tr> <tr><td>SN 34</td><td>334</td><td>37</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>SN 35</td><td>317</td><td>15</td><td>Plano</td></tr> <tr><td>SN 36</td><td>312</td><td>44</td><td>Punto</td></tr> </tbody> </table>	Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste	SN 29	29	31	Línea	SN 30	355	51	Plano	SN 31	332	34	Plano	SN 32	334	30	Línea	SN 33	12	31	Línea	SN 34	334	37	Plano	SN 35	317	15	Plano	SN 36	312	44	Punto	<p>Piso quemado</p>
Especímenes usados para los cálculos	Dec	Inc	Tipo de ajuste																																				
SN 29	29	31	Línea																																				
SN 30	355	51	Plano																																				
SN 31	332	34	Plano																																				
SN 32	334	30	Línea																																				
SN 33	12	31	Línea																																				
SN 34	334	37	Plano																																				
SN 35	317	15	Plano																																				
SN 36	312	44	Punto																																				
<p>Sierra de las Navajas Muestras 3 y 4 SN E3 y SN E4</p>	<p>(Schmidt)</p>  <p>Axial N = 15</p>	<p>Los especímenes que se usaron para el cálculo, aparecen en la tabla siguiente</p> <table border="1"> <tbody> <tr><td>SN 20</td><td>SN 29</td></tr> <tr><td>SN 21</td><td>SN 30</td></tr> <tr><td>SN 23</td><td>SN 31</td></tr> <tr><td>SN 24</td><td>SN 32</td></tr> <tr><td>SN 25</td><td>SN 33</td></tr> <tr><td>SN 27</td><td>SN 34</td></tr> <tr><td></td><td>SN 35</td></tr> <tr><td></td><td>SN 36</td></tr> </tbody> </table>	SN 20	SN 29	SN 21	SN 30	SN 23	SN 31	SN 24	SN 32	SN 25	SN 33	SN 27	SN 34		SN 35		SN 36	<p>Se unieron los datos de ambas muestras, pues no era posible determinar la declinación y la inclinación por separado. Las 2 muestras pertenecen al mismo fogón, por la distribución en un plano de los datos se obtuvieron la declinación y la inclinación a través de ajuste de plano.</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Declinación</td> <td>Inclinación</td> </tr> <tr> <td>356.0</td> <td>40.0</td> </tr> <tr> <td colspan="2">MAD = 13.40</td> </tr> </tbody> </table>	Declinación	Inclinación	356.0	40.0	MAD = 13.40															
SN 20	SN 29																																						
SN 21	SN 30																																						
SN 23	SN 31																																						
SN 24	SN 32																																						
SN 25	SN 33																																						
SN 27	SN 34																																						
	SN 35																																						
	SN 36																																						
Declinación	Inclinación																																						
356.0	40.0																																						
MAD = 13.40																																							

Para obtener las fechas probables se empleó el programa RENDATE (Lanos, 2004). Se comparó la dirección obtenida con la curva maestra de variación secular (Soler et al., 2006, ampliada) y se corrigió con las coordenadas del sitio. El programa RENDATE se basa en estadística bayesiana para encontrar las fechas con mayor probabilidad.

En las tabla 6.22, 6.23, y 6.24 se exhiben las gráficas de la declinación, la inclinación y sus intersecciones con las curvas de referencia respectivas, así como la combinación de las intersecciones y los intervalos de tiempo resultado de estas intersecciones, de las muestras SN: E1, E2, E3 y E4.

Tabla 6.22 Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra SN E1, obtenidas en el sitio arqueológico Sierra de las Navajas, Hidalgo. Intervalos de tiempo producto de la intersección.

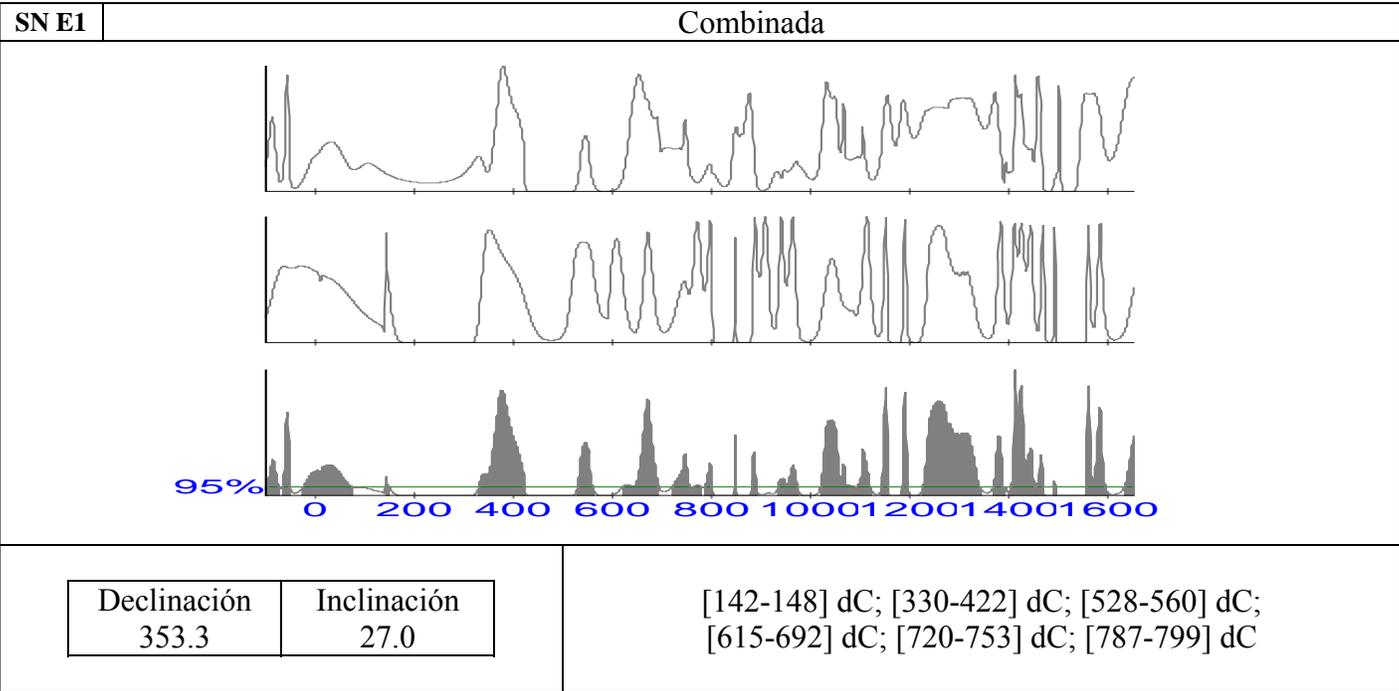


Tabla 6.23 Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra SN E2, obtenidas en el sitio arqueológico Sierra de las Navajas, Hidalgo. Intervalos de tiempo producto de la intersección

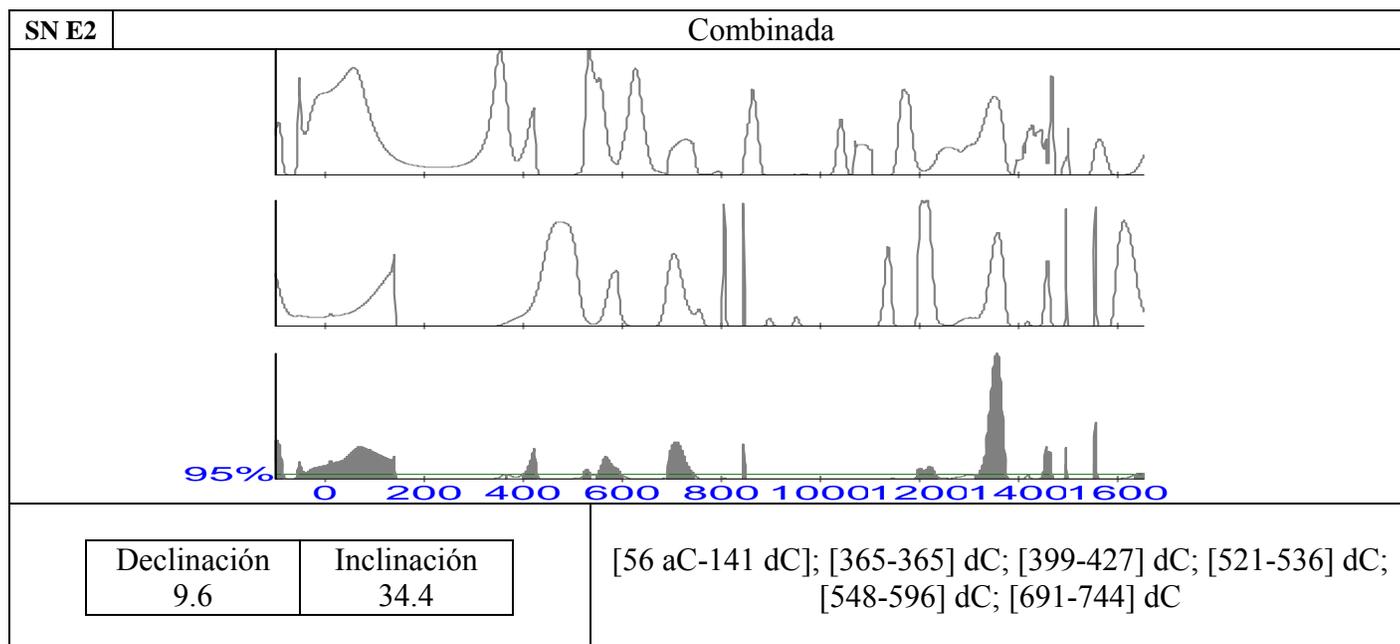
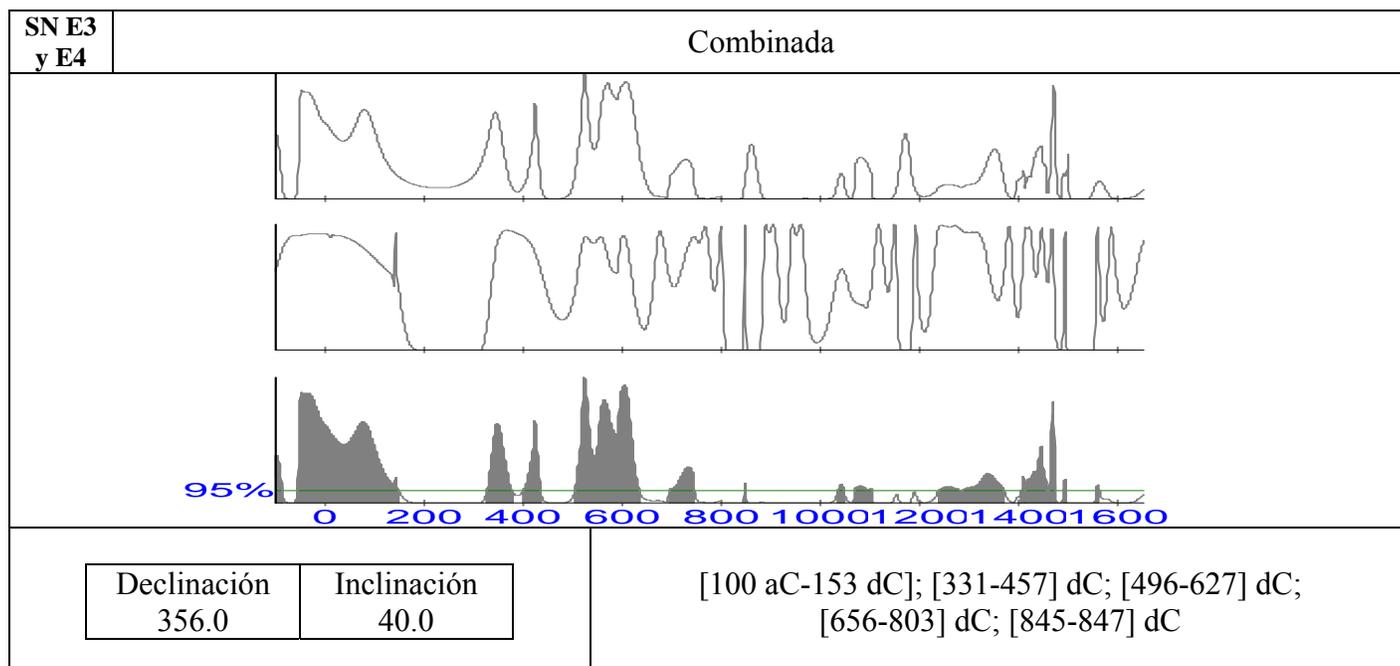


Tabla 6.24 Gráfica de la combinación de intersección del valor medio de inclinación y declinación con la curva de variación secular de la muestra SN E3 y SN E4, obtenidas en el sitio arqueológico Sierra de las Navajas, Hidalgo. Intervalos de tiempo producto de la intersección



## 6.4 Estudios magnéticos complementarios

Como parte de los estudios magnéticos complementarios, los cuales están diseñados para obtener información característica de los minerales magnéticos presentes en el material arqueológico con el que se trabajó, se llevaron a cabo el laboratorio mediciones para conocer la anisotropía de susceptibilidad magnética, mediciones de ciclos de histéresis magnética, y el comportamiento de la susceptibilidad magnética con la variación de la temperatura.

En la tabla 6.23 se muestran las gráficas producto del estudio de comportamiento de la susceptibilidad magnética con la variación de la temperatura mediante un susceptibilímetro Bartington MS2 con horno MS2WFP. Con este estudio se infiere la temperatura de Curie de los minerales magnéticos que están presentes en las muestras con los que se trabajó. Este estudio se llevó a cabo con material de un espécimen, pues en general el comportamiento cualitativo de la muestra queda representado por un espécimen. De la muestra Xal3 no se incluye el resultado de este experimento ya su susceptibilidad era muy baja y por tanto era del orden de la resolución del instrumento.

Tabla 6.23 Gráficas producto del estudio de comportamiento de la susceptibilidad magnética con la variación de la temperatura

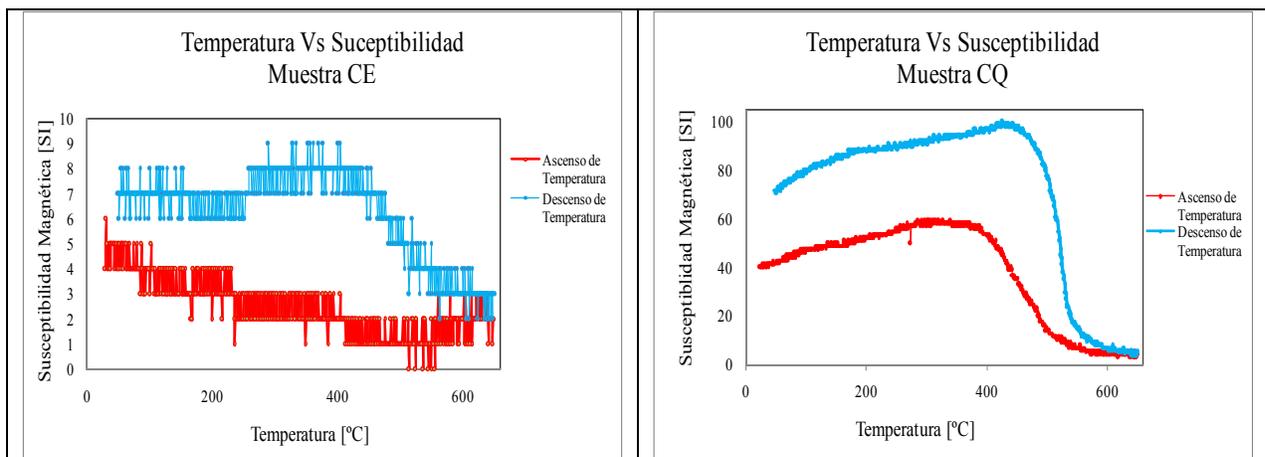


Tabla 6.23 Graficas producto del estudio de comportamiento de la susceptibilidad magnética con la variación de la temperatura

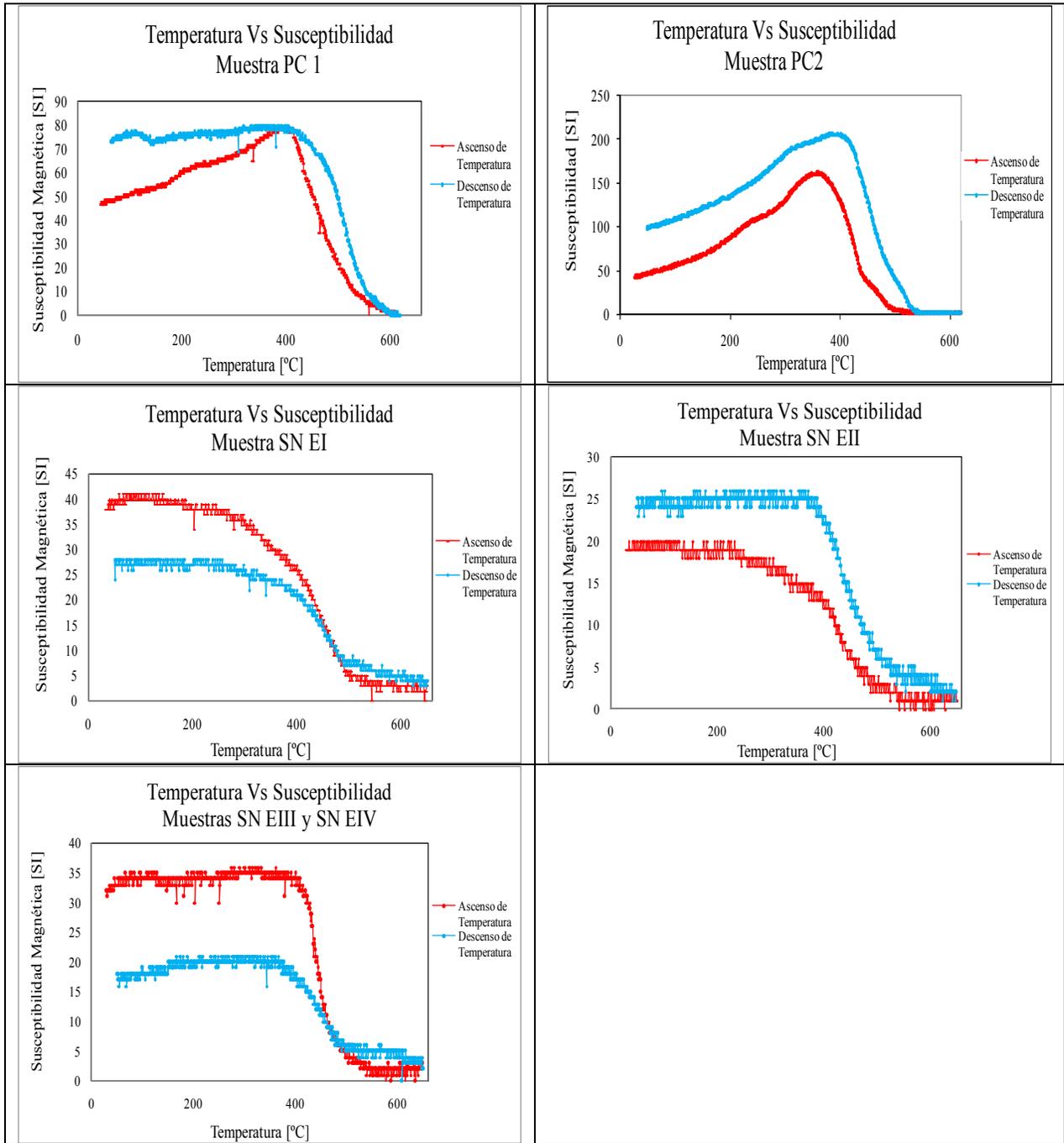
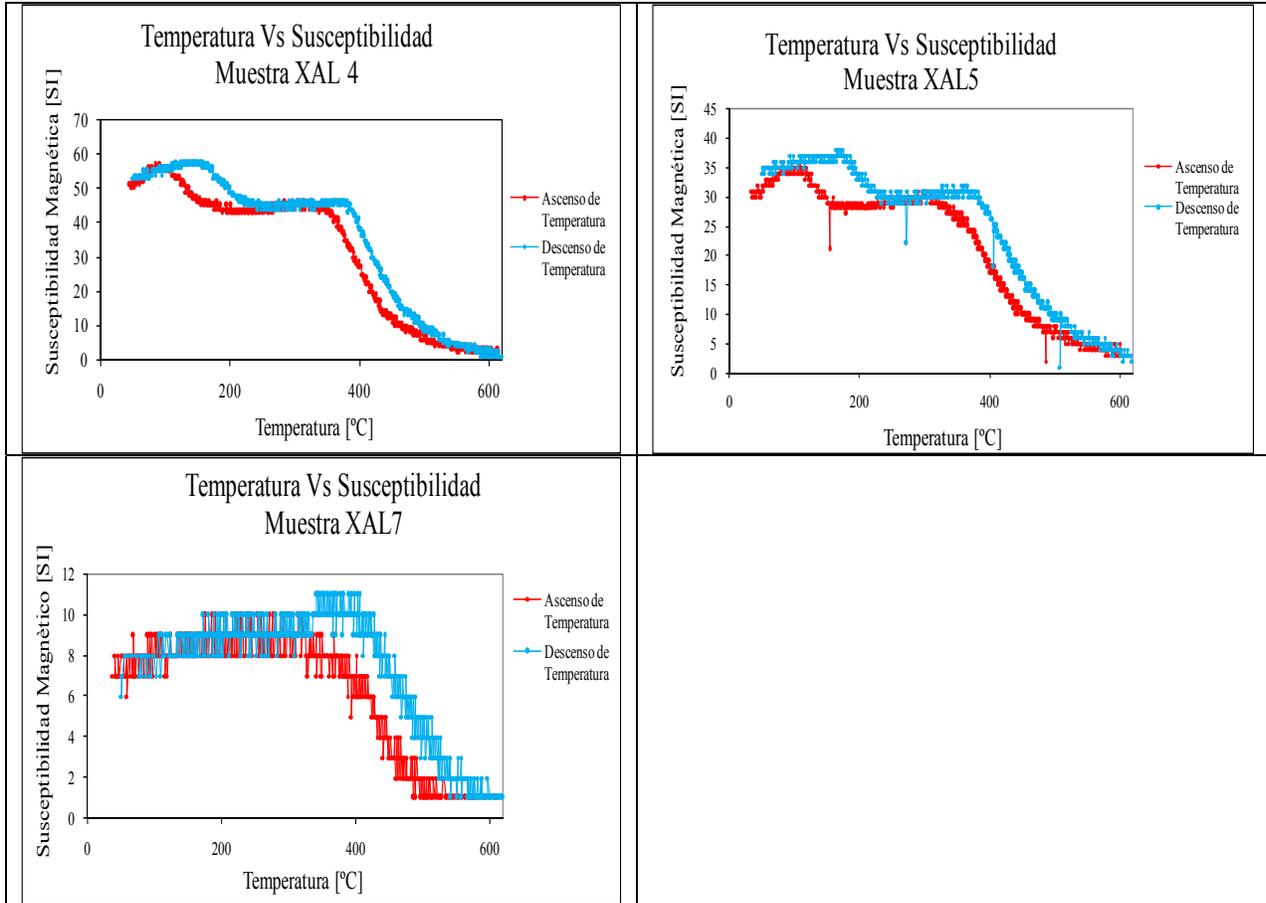


Tabla 6.23 Graficas producto del estudio de comportamiento de la susceptibilidad magnética con la variación de la temperatura



Las curvas en su mayoría presentan una sola fase magnética característica de las titanomagnetitas pobres en Titanio. En Xal4 y Xal5 se observaron 2 fases termo magnéticas, tanto en el calentamiento como en el enfriamiento, la primera correspondiente a titanomagnetitas ricas en Titanio y la segunda como las demás muestras Titanomagnetitas pobres en titanio, lo que podría atribuirse a la posible transformación de titanomagnetita en titanohematita durante el calentamiento, pero se observa lo mismo en el enfriamiento.

En la tabla 6.24 se muestran las graficas producto del estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética. En

este experimento se usó un susceptibilmetro magnético Kappabridge KLY-2. Este estudio esta diseñado para conocer de qué forma están organizados físicamente los elementos portadores de la información magnética, es decir, de que tipo de fábrica magnética se trata.

Tabla 6.24 Graficas producto del estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética. En las graficas los símbolos corresponden a:  $\blacksquare$   $k_1$ ,  $\blacktriangle$   $k_2$ ,  $\bullet$   $k_3$ .

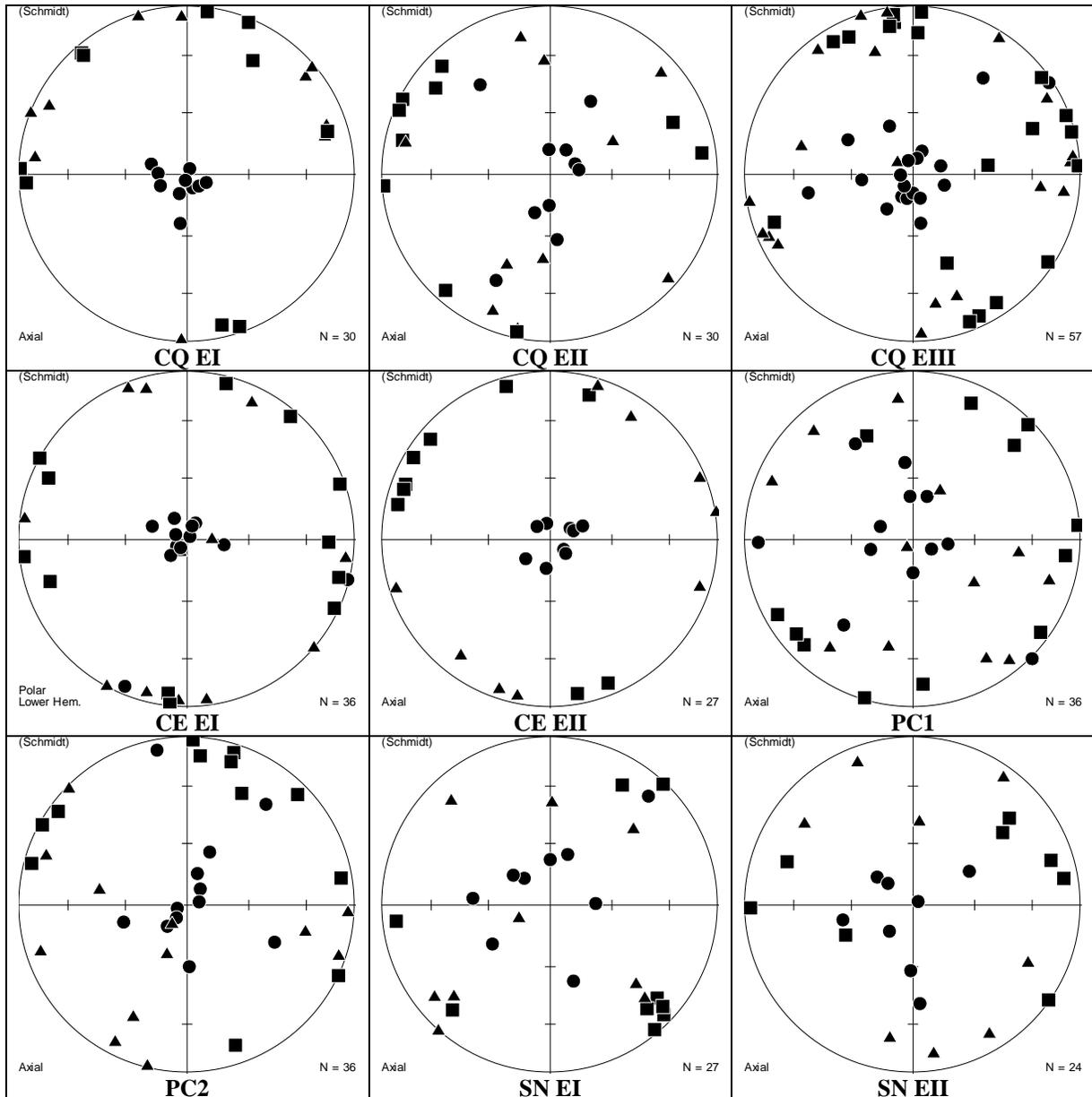
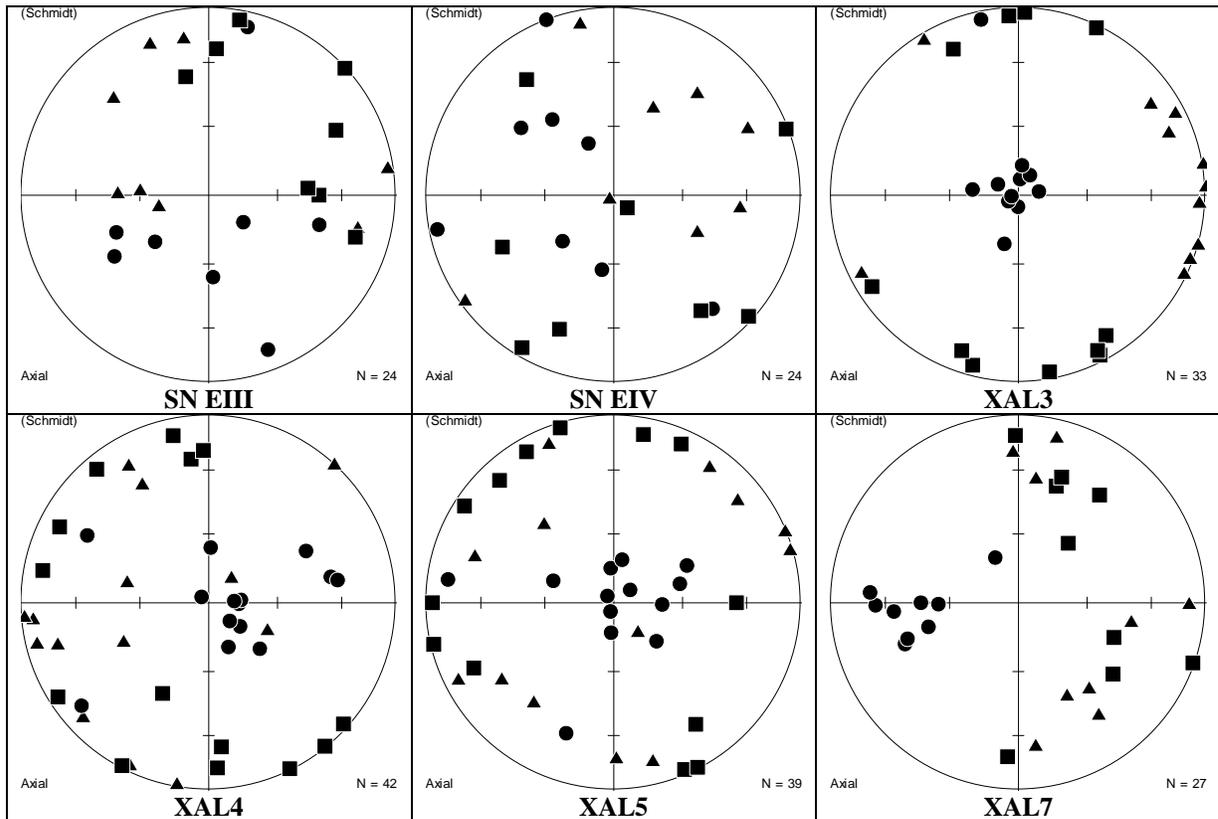


Tabla 6.24 Graficas producto del estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética. En las graficas los símbolos corresponden a: ■  $k_1$ , ▲  $k_2$ , ●  $k_3$ .



Los resultados de la Tabla 6.24 muestran que las muestras de Teotihuacan en todos los casos la fábrica magnética fue oblada, con el eje de mínima susceptibilidad  $k_3$  perpendicular al plano horizontal y por tanto una fábrica de tipo sedimentario.

En el caso de Sierra de las Navajas, las muestras presentan mayor dispersión, ya que no son estucos sino suelos quemados como puede observarse en las fotografías, pero su tendencia es a una fábrica también oblada con eje  $k_3$  perpendicular al plano horizontal y por tanto también es de tipo sedimentario.

Las muestras de Xalasco, a excepción de Xal7, que era una argamasa quemada, mostraron una clara fábrica de tipo sedimentaria, con  $k_3$  agrupado en el eje perpendicular al plano horizontal y los ejes  $k_2$  y  $k_3$  en el plano

horizontal o de depósito.

En la tabla 6.25 se muestran las graficas producto del experimento de ciclos de histéresis magnética a temperatura ambiente, con este estudio se investiga el tipo de dominio magnético en el que están organizados los minerales magnéticos contenidos en las muestras con las que se trabajo. Se uso un magnetómetro micromag AGFM (Alternating Gradient Field Magnetometer), el cual por medio de un equipo de cómputo asociado, mide y grafica el ciclo de histéresis y proporciona en esta misma los parámetros que caracterizan a la muestra, los cuales son: magnetización de saturación (Ms), saturación de remanencia (Mrs) y coercitividad (Hc). También se determino la coercitividad de la remanencia Hcr después de aplicar una magnetización remanente isothermal IRM (por sus siglas en ingles). El experimento se llevo a cabo en material correspondiente a un solo espécimen pues el comportamiento cualitativo de la muestra queda representado por el comportamiento cualitativo de un espécimen, el espécimen se eligió al azar.

Tabla 6.25 Gráficas producto del estudio de ciclos de histéresis magnética y de IRM.

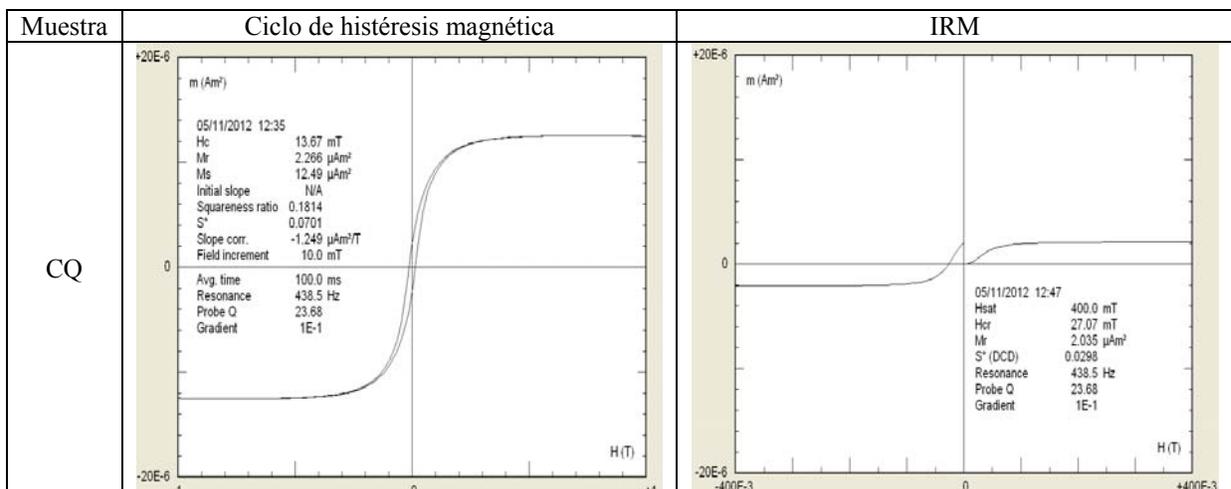


Tabla 6.25 Gráficas producto del estudio de ciclos de histéresis magnética y de IRM.

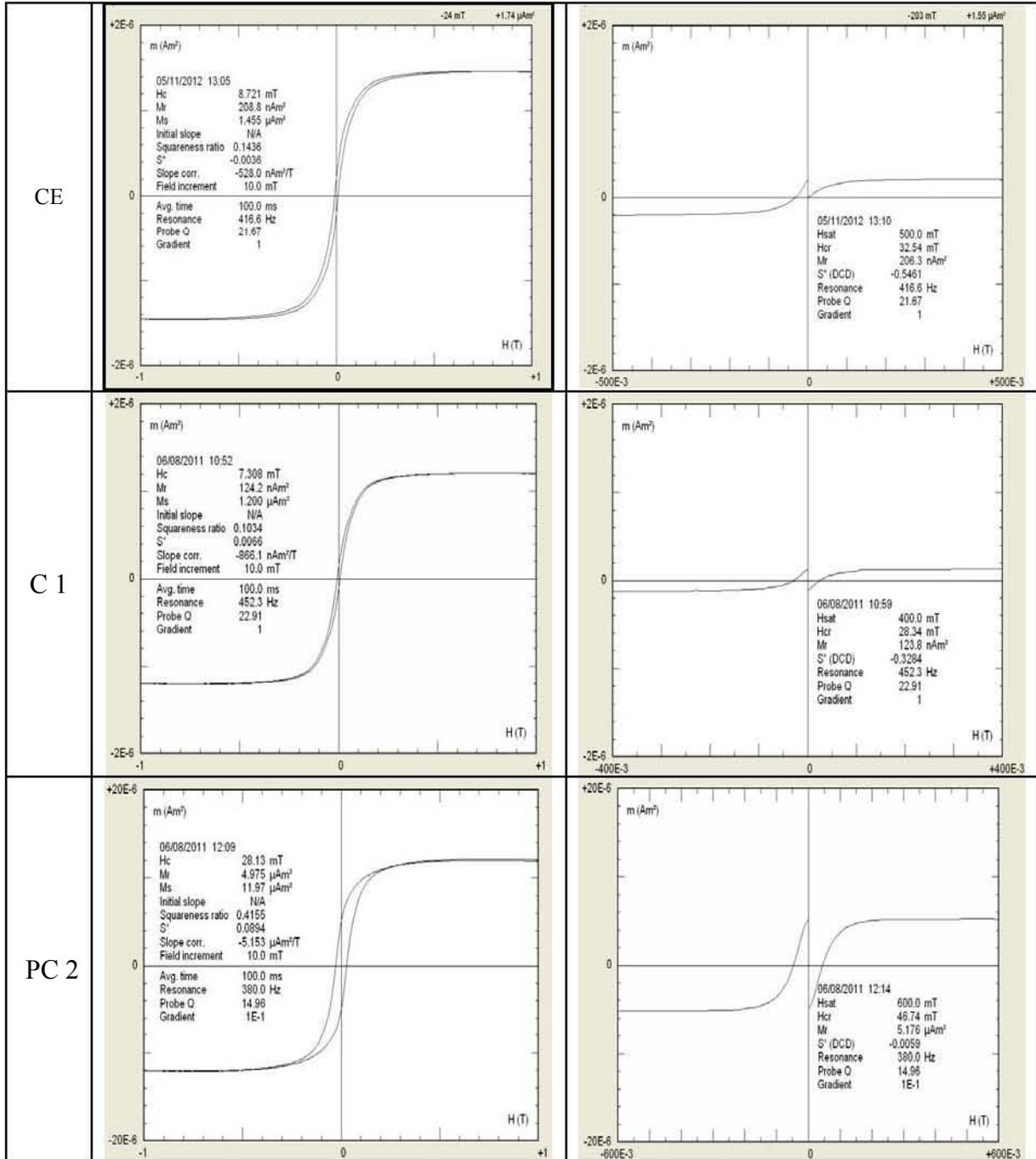


Tabla 6.25 Gráficas producto del estudio de ciclos de histéresis magnética y de IRM.

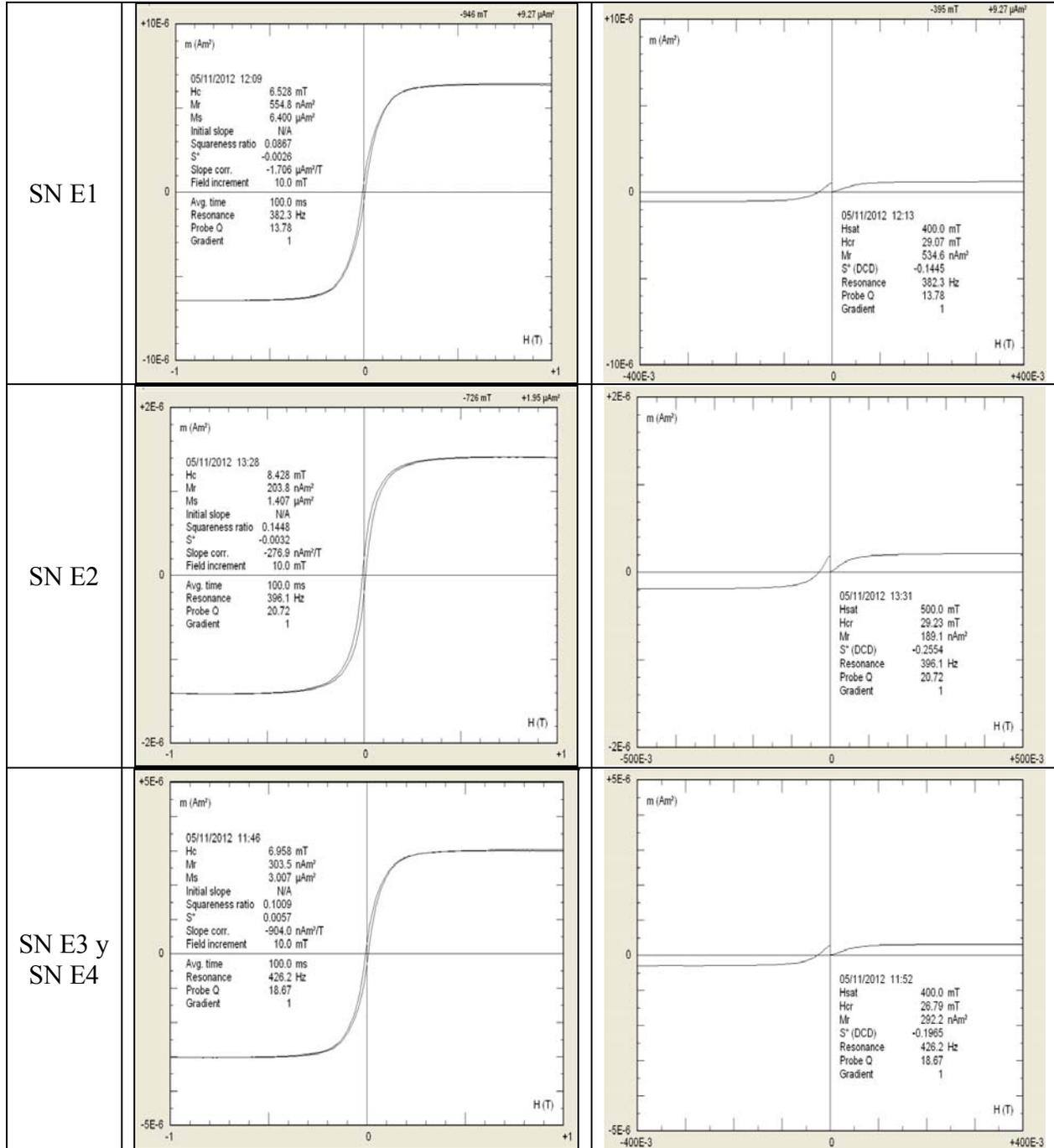
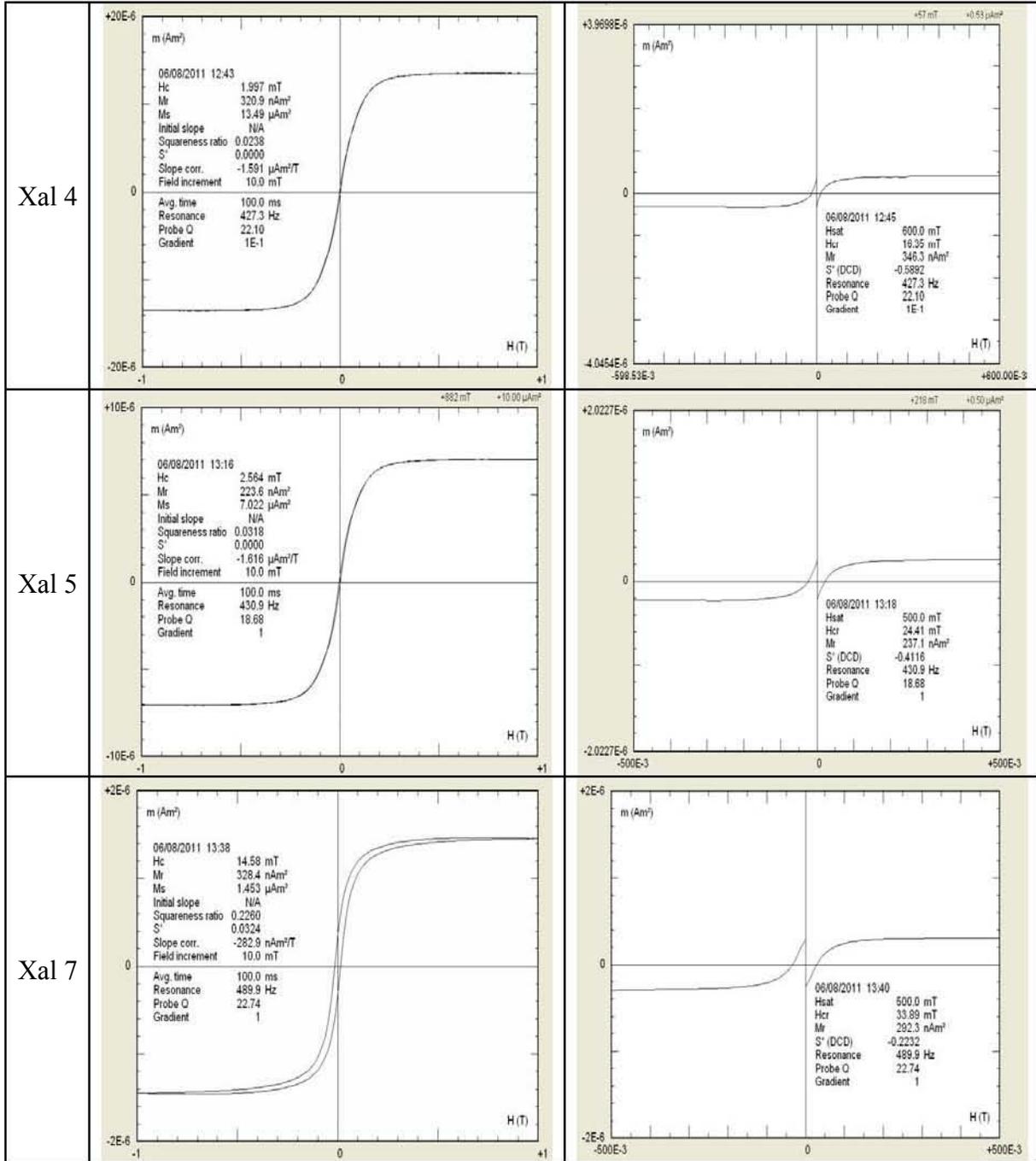


Tabla 6.25 Gráficas producto del estudio de ciclos de histéresis magnética y de IRM.



El estudio correspondiente a los ciclos de histéresis nos permite conocer el tipo de dominio magnético, haciendo uso del diagrama de Day, modificado por Dunlop. En la figura 6.26, se muestran los resultados de este estudio.

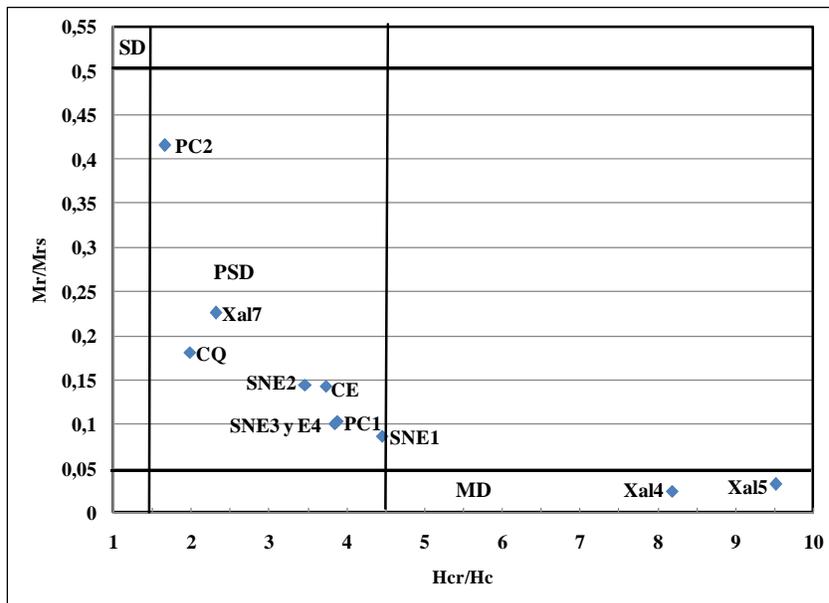


Figura 6.26 Diagrama de Day, parte de los resultados del experimento de ciclos de histéresis magnética.

Podemos observar en la fig. 6.26 que la mayoría de las muestras se encuentran en la zona de dominio pseudo sencillo, lo que probablemente indica que es la mezcla de dominios sencillos y múltiples.

# Capítulo 7. Resultados

En la Tabla 7.1 se exhibe la información obtenida con el método de datación arqueomagnética del sitio La Ciudadela en Teotihuacan, Estado de México.

Tabla 7.1 Resultados del estudio de datación arqueomagnética, realizado en La Ciudadela, Teotihuacan. Donde **Dec** es la declinación; **Inc** es la inclinación,  $\alpha_{95}$ , **k** y **R**, son parámetros estadísticos, **n** número de especímenes que intervinieron en los cálculos, **N** número total de especímenes de los que se componía la muestra. Así como las temporalidades esperadas

Muestra	n/N	Dec [grados]	Inc [grados]	$\alpha_{95}$	k	R	Fechas probables	Temporalidad Arqueológica Esperada	
CQ	E1 (q)	9/10	359.0	37.6	3.9	174.4	8.954	[344-352] dC	Inicio Xolalpan Nueva fase constructiva <sup>1</sup> Expulsión de Grupo militar y posible llegada de teotihuacanos a Tikal 375-450 dC <sup>2</sup>
	E2 (q)	10/10	2.9	38.4	2.6	353.5	9.975	[412 - 427] dC	Posible ritual de terminación de Xolalpan temprano <sup>1</sup>
	E3 (nq)	15/18	348.5	40.2	1.7	546.4	14.97	[327 - 345] dC	Inicio Xolalpan Nueva fase constructiva <sup>1</sup> Expulsión de Grupo militar y posible llegada de teotihuacanos a Tikal 375-450 dC <sup>2</sup>
CE	E1 (nq)	10/11	359.0	38.0	MAD = 16.47		[57 aC - 145 dC]	Construcción del Templo, en las fases Tzacualli y Miccaotli [1-200] dC <sup>3</sup>	
	E2 (q)	9/9	1.0	38.3	2.8	332.2	8.976	[412 - 427] dC o [520 - 528] dC	Posible ritual de terminación de Xolalpan temprano <sup>1</sup> o Gran incendio <sup>1</sup> 575 +/-25
PC	1 y 2 (nq)	21/24	3.0	39.0	MAD = 13.80		[57 aC - 143 dC]	Etapa previa de Construcción de la Ciudadela <sup>4</sup>	

1) Beramendi, 2009 2) Cabrera, 1998 3) Rattray, 1991 4) Sugiyama. 1998

Los especímenes de las muestras denominadas CQ E1, CQ E2 y CQ E3, en donde CQ E1 y CQ E2 son muestras de material quemado y CQ E3 es una muestra de material no quemado, mostraron un comportamiento bastante estable, y como resultado sólo se tuvo agrupamiento en la proyección estereográfica y colinealidad en el diagrama de Zijderveld, por estas características fue posible aportar valores de inclinación y declinación

medias, con valores de parámetros estadísticos que hacen a los resultados bastante confiables ( $\alpha_{95}$  pequeñas y grandes  $k$ 's), ergo fue posible aportar los intervalos de tiempo: [344-352] dC; [412-427] dC y [327-345] dC, respectivamente. En la tabla 7.1 se muestra la buena correlación con eventos descritos por los diferentes autores referidos en la misma.

Los especímenes de la muestra CE E1, la cual es una muestra de material no quemado, mostraron un tipo de comportamiento de la señal magnética, que se caracteriza por presentar en los diagramas de Zijderveld dos tendencias y, por consecuencia, un plano en la proyección estereográfica, así entonces fue posible aportar valores de inclinación y declinación medias, con valores de parámetros estadísticos con gran incertidumbre para un ajuste de planos (MAD=16.47), y en consecuencia un intervalo de tiempo grande [57 aC - 145 dC], pero mejor que muchos casos de radiocarbono. Este período corresponde a la etapa previa a la construcción del Templo de Quetzalcoatl. Los especímenes de la muestra CE E2, la cual es una muestra de material quemado, mostraron solo una tendencia en el diagrama de Zijderveld, y por consecuencia agrupamiento en la proyección estereográfica, esta característica permitió calcular los valores de inclinación y declinación medias de la muestra con valores de confianza estadística muy buenos; pero existen dos temporalidades igualmente probables [412-427] dC, que correspondería a una etapa violenta en la urbe que marcan el inicio del Xolalpan tardío o bien al Incendio Final del [520-528] dC.

Los especímenes de las muestras PC1 y PC2, las cuales son muestras de material no quemado, mostraron en el diagrama e Zijderveld un comportamiento de dos tendencias y en la proyección estereográfica distribución en un plano, pero al calcular la declinación e inclinación media, e intersecarla con la curva de variación secular, no se obtuvieron resultados consistentes con la información arqueológica, por esto se tomó la decisión de unir las dos muestras, ya que eran parte de un mismo piso y así se obtuvieron las medias de la declinación y la inclinación. EL comportamiento de nuevo fue de un plano con un parámetro estadístico de confianza MAD = 13.80, considerado aceptable para el caso de muestras arqueológicas no quemadas, por lo que nos fue posible

aportar el intervalo de tiempo [57 aC-143 dC].

Podemos en general observar que los pisos quemados mostraron menores  $\alpha_{95}$ , a excepción del CQ E3 que a pesar de ser un piso no quemado mostró el menor  $\alpha_{95}$  del estudio.

Como puede también observarse en la tabla 7.1 las dataciones obtenidas son correspondientes con dataciones de radiocarbono como también con la estratigrafía del sitio propuesta por los Arqueólogos encargados del área.

En la Tabla 7.2 se vierte la información obtenida con el método de datación arqueomagnético para las muestras del sitio arqueológico de Xalasco, Tlaxcala. En donde **Dec** es la declinación, **Inc** es la inclinación;  $\alpha_{95}$ , **k** y **R**, son parámetros estadísticos, **n** es el número de especímenes que intervinieron en los cálculos y **N** es el número de especímenes medidos.

Tabla 7.2 Resultados del estudio de datación arqueomagnética, realizado las muestras obtenidas en el conjunto arqueológico de Xalasco, Tlaxcala. Donde **Dec** es la declinación; **Inc** es la inclinación,  $\alpha_{95}$ , **k** y **R**, son parámetros estadísticos. **n** número de especímenes que intervinieron en los cálculos, **N** número total de especímenes de los que se componía la muestra. Así como las temporalidades esperadas.

Muestra	n/N	Dec [grados]	Inc [grados]	$\alpha_{95}$	k	R	Fechas probables	Temporalidad Arqueológica Esperada	
XAL	3 (q y nq)	11/11	350.7	37.6	9.1	16.81	10.41	[323-372] dC [403-426] dC [516-642] dC	Mas joven a (690 - 980 dC)
	4 (nq)	6/14	358.8	32.0	8.2	41.99	5.88	[341-424] dC	Xolalpan temprano 325 – 415 dC
	5 (nq)	12/13	352.6	44.2	MAD=9.06		[548-626] dC	Xolalpan temprano 325 – 415 dC	
	6 (nq)	<b>No fue posible determinar fecha, solo se contaba con 2 especímenes</b>							
	7 (q)	8/9	341.3	28.5	9.6	21.29	7.67	[616 , 670] dC	<sup>14</sup> C (540-720dC)

Del sitio Xalasco en el Estado de Tlaxcala, se obtuvieron cinco muestras. Los especímenes de la muestra Xal 3, muestra no quemada, mostraron un comportamiento en los diagramas de Zijderveld con dos tendencias y por consecuencia tendencia a un plano en la proyección estereográfica, por tanto se obtuvieron los valores

medios de la declinación y la inclinación con valores de parámetro de confianza correspondiente a ajuste de plano. Las direcciones medias de los especímenes sí mostraron agrupamiento y por tanto fue posible calcularla mediante estadística Fisher y establecer una datación de [516-642] dC.

Para Xal 6 sólo se contaba con dos especímenes y no fue posible datar esta muestra, a pesar de ser un muro quemado del mismo cuarto y nivel de la muestra Xal 3. Nosotros esperaríamos un mejor comportamiento de Xal 6 por ser una muestra quemada, pero los dos especímenes estudiados no presentaron un comportamiento similar, que sería resultado de la exposición al fuego, por el contrario mostraron gran dispersión tanto en su comportamiento individual como al comparar a los dos especímenes.

Los especímenes de la muestra Xal 4, la cual es una muestra de material no quemado, exhibieron 2 tipos de comportamientos. El primero en donde las gráficas de desmagnetización son decrecientes, los diagramas de Zijderveld son colineales, y las proyecciones estereográficas agrupadas. El segundo caso fue un comportamiento en los diagramas de Zijderveld con dos tendencias y, por consecuencia, un plano en la proyección estereográfica, sin embargo, la muestra presentó tendencia a un punto en la proyección estereográfica, por lo cual fue posible determinar los valores de inclinación y declinación medias, con parámetros estadísticos de Fisher confiables y datar la muestra con el intervalo de tiempo [341-424] dC.

Los especímenes de la muestra Xal 5, muestra de material no quemado presentó comportamiento con tendencia a un plano y fue posible establecer una declinación e inclinación medias con un parámetro estadístico de confianza  $MAD = 9.06$  (aceptable para muestras arqueológicas no quemadas).

Se pensaba que Xal 4 y Xal 5 eran parte de un mismo piso, pero como muestran los resultados presentan dos direcciones perfectamente diferenciables y por tanto también intervalos de tiempo no comunes.

Los especímenes de Xal 7 presentaron un comportamiento en donde las gráficas de desmagnetización son decrecientes, los diagramas de Zijderveld son colineales, y las proyecciones estereográficas agrupadas, por

muestra se obtuvo tendencia a un punto, por tanto fue posible calcular la inclinación y la declinación medias con parámetros estadísticos de Fisher confiables y datar las muestras con los intervalos de tiempo [616-670] dC.

En la Tabla 7.3 se condensa la información obtenida con el método de datación arqueomagnético. En donde **Dec** es la declinación, **Inc** es la inclinación,  $\alpha_{95}$ , **k** y **R**, son parámetros estadísticos, **n** es el número de especímenes que intervinieron en los cálculos y **N** es el número de especímenes procesados.

Tabla 7.3 Resultados del estudio de datación arqueomagnética, realizado en las muestras obtenidas en el sitio arqueológico de Sierra de las Navajas, Hidalgo. Donde **Dec** es la declinación; **Inc** es la inclinación,  $\alpha_{95}$ , **k** y **R**, son parámetros estadísticos, **n** número de especímenes que intervinieron en los cálculos, **N** número total de especímenes de los que se componía la muestra. Así como las temporalidades esperadas.

Muestra		n/N	Dec [grados]	Inc [grados]	$\alpha_{95}$	k	R	Fechas probables	Temporalidad Arqueológica Esperada
SN	E1(q)	5/9	353.3	27.0	9.6	39.02	4.9	[528-560] dC	Xolalpan tardío 460-545 dC
	E2 (q)	6/8	9.6	34.4	8.7	37.05	5.9	[399-427] dC	Xolalpan 325-550 dC
	E3 (q)	5/8	356.0	40.0	MAD = 13.40			[331-457] dC	Tlalmimilolpa 200 -270 dC
	E4 (q)	8/8							

Del sitio “Sierra de las Navajas” en el Estado de Hidalgo, se obtuvieron cuatro muestras correspondientes a tres talleres de artesanos de la obsidiana distintos. Los especímenes de las muestras SN E1 y SN E2 , muestras de pisos – suelo quemado, presentaron 2 tipos de comportamientos; el primero en donde las gráficas de desmagnetización son decrecientes, los diagramas de Zijderfeld son colineales y las proyecciones estereográficas de cada paso son agrupadas, el segundo caso fue un comportamiento en los diagramas de Zijderfeld con dos tendencias y, por consecuencia, un plano en la proyección estereográfica, sin embargo el comportamiento de estas muestras se caracterizó por presentar una tendencia en los diagramas de Zijderfeld, lo cual implica tendencia a un punto en por estas características fue posible aportar valores de inclinación y declinación medias, mediante estadística Fisher con valores de parámetros estadísticos que hacen a los

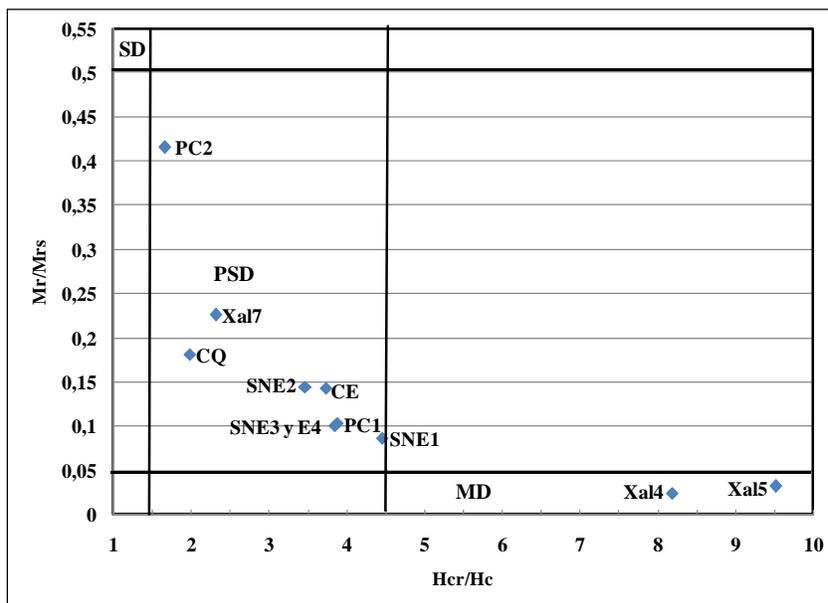
resultados bastante confiables ( $\alpha_{95} < 10$ ). Los resultados nos permitieron aportar los intervalos de tiempo: [528-560] dC y [399-427] dC respectivamente. Lo que claramente correspondía con la estratigrafía del sitio (véase imagen 6.17).

Los especímenes de las muestras SN E3 y SN E4, las cuales son muestras de material quemado, presentaron un comportamiento en los diagramas de Zijderveld con dos tendencias y, por consecuencia, tendencia a un plano en la proyección estereográfica, para este caso se obtuvieron los valores medios de la inclinación y declinación, con parámetro de confianza correspondiente a ajuste de planos, con el cual fue posible datar la muestra con el intervalo de tiempo [331-457] dC. A pesar de ser especímenes del interior y alrededores de un fogón no mostraron un buen agrupamiento ( $MAD = 13.4$ ) lo que atribuimos a su exposición al intemperismo.

El estudio de comportamiento de la susceptibilidad magnética con la variación de la temperatura, nos permite conocer el mineral magnético presente en las muestra arqueológicas con las que se trabajo y se obtuvo que, en todas las muestras a las que se les realizó el estudio contienen minerales de oxido de titanio pobres en titanio a excepción de Xal4 y Xal5; donde se observaron 2 fases termomagnéticas, tanto en el calentamiento como en el enfriamiento, la primera correspondiente a titanomagnetitas ricas en Titanio y la segunda como las demás muestras Titanomagnetitas pobres en titanio, lo que podría atribuirse a la posible transformación de titanomagnetita en titanohematita durante el calentamiento, pero se observa lo mismo en el enfriamiento.

El estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética nos permitió conocer la disposición física de los minerales portadores de información magnética. Las muestras con que se trabajo presentan un fabrica magnética oblada con foliación horizontal, elipsoides girando al rededor de su eje mínimo, los planos sobre los que residen de los elipsoides corresponden al plano de foliación magnética, lo que nos indica una fábrica primaria de la cual se obtuvo la magnetización, es magnetización de tipo detrítica. Esta determinación es muy importante en las muestras no quemadas.

El estudio correspondiente a los ciclos de histéresis nos permite conocer el tipo de dominio magnético, haciendo uso del diagrama de Day. En la figura 6.26, se muestran los resultados de este estudio.



Podemos observar en la fig. 6.26 que la mayoría de las muestras se encuentran en la zona de dominio pseudo sencillo, lo que probablemente indica que es la mezcla de dominios sencillos y múltiples.

Los resultados de propiedades magnéticas de rocas nos permiten inferir la confiabilidad de las direcciones obtenidas como también de las dataciones.

# Conclusiones

---

Para el desarrollo de esta tesis se trabajaron muestras de tres sitios arqueológicos de la cultura Teotihuacana, del primero, “La Ciudadela” en la zona arqueológica de Teotihuacan en el Estado de México, se obtuvieron siete muestras correspondientes a cuatro etapas constructivas distintas. Los resultados nos permitieron establecer cinco temporalidades [57 aC - 143 dC], [327 - 345 dC], [344 - 352 dC], [412-427] dC, [520 - 528dC] y respectivamente, como puede verse en la tabla 7.1 del capítulo anterior. La mayoría de los intervalos son menores a 50 años, lo que confirma que en muchos casos la resolución del método arqueomagnético es mejor que la del radiocarbono, y que en general es mejor el registro magnético en los estucos quemados que en los no quemados.

Estos resultados concuerdan con la cronología propuesta por Beramendi et al., 2009, para Teopancazco confirmando la ocurrencia de rituales comunes para los barrios y área central de Teotihuacan. Los resultados muestran claramente la expulsión del grupo de Quetzalcóatl, caracterizado por la quema de dicha pirámide, como también el inicio de la nueva etapa caracterizado por la construcción de la pirámide adosada. Los resultados obtenidos muestran la evolución del área de la Ciudadela coincidente con la estratigrafía y únicamente no pudimos resolver el caso del Conjunto E (CEE2), donde dos posibles eventos podrían ser el origen de la magnetización.

En la Sierra de las Navajas en el Estado de Hidalgo, se obtuvieron cuatro muestras correspondientes a tres talleres distintos de artesanos de la obsidiana. Todos los especímenes eran de material quemado, suelos – apisonados y siempre presentaron 2 tipos de comportamientos: con tendencia a agruparse a un punto y distribución en un plano, por tanto en el primer se observaron buenos agrupamientos SN1 y SN2 ( $\alpha_{95} < 10$ ) y en

el caso de SN3 y 4 un parámetro estadístico de confianza  $MAD = 13.4$ . El comportamiento de estas muestras nos permitió aportar valores de inclinación y declinación medias, con valores de parámetros estadísticos que hacen a los resultados bastante confiables, fue posible aportar los intervalos de tiempo: [528-560] dC, [399-427] dC y [399-427] dC respectivamente, que únicamente en el caso de SN3 y 4 no corresponde con la etapa del asentamiento, pero que nosotros atribuimos al ser más tardía a una probable reocupación, o más bien rehúso del fogón.

Los resultados obtenidos muestran que el sitio, como era de esperarse, funcionaba muy activamente durante el Xolalpan, período de gran auge de la metrópoli teotihuacana y por tanto de gran necesidad de productos de obsidiana. También se denota la presencia del ritual de terminación de dicho auge [528-560] dC.

Del tercer sitio, “Xalasco” en el Estado de Tlaxcala, se obtuvieron cinco muestras. A pesar de ser en su mayoría muestras no quemadas nos fue posible establecer direcciones medias con  $\alpha_{95}$  aceptables, menores a  $10^\circ$  y por tanto dataciones con intervalos cercanos a 90 años, a excepción de Xal7 donde fue de 65 años y mucho menor que el establecido por radiocarbono de 180 años. Se aportaron 4 dataciones: [514-650] dC, [338-424] dC, [548-626] dC y [610-675] dC.

Los resultados nos permitieron establecer que Xal4 y Xal5 no eran un mismo piso. Obsérvense las diferencias en direcciones y por tanto en dataciones, también puede atribuirse a un arreglo o reparación de ese piso. Respecto a Xal3 y Xal6 que se esperaba que Xal3 nos diera la etapa de construcción y Xal6 una datación por huellas de fuego, no fue posible como ya se comentó con anterioridad, debido probablemente a que Xal6 hubiese sido afectada por algún tipo de intemperismo.

Las fechas más tempranas obtenidas en Xalasco son Xolalpan, época del gran auge en la metrópoli de Teotihuacan y de ahí la importancia de Xalasco como sitio de paso de las caravanas del Golfo, y por tanto ocupado al menos desde ese momento. En el sitio también se obtuvieron fechas más tardías al gran incendio

(550 +/-25 dC), por lo que podemos inferir que el sitio continuó ocupándose entre 616 y 670 dC.

Para identificar y caracterizar la mineralogía magnética de las muestras con las que se trabajó, y conocer su estructura de dominio magnético, se llevaron a cabo los experimentos: susceptibilidad magnética Vs temperatura y ciclos de histéresis, con los cuales fue posible determinar que en la mayoría de los casos la presencia de titanomagnetitas pobres en titanio como el principal portador de la información magnética, así como establecer que buena parte de las muestras presentan la existencia de dominios pseudo sencillos, se encontró también, en menor medida, la existencia de multi dominios. También es importante la aportación de la fábrica magnética en el caso de pisos no quemados, donde nos permite inferir una fábrica sedimentaria y por tanto una datación confiable.

Se procesaron para todos los experimentos efectuados 170 especímenes correspondientes a 13 muestras con las cuales fue posible aportar 10 dataciones en el intervalo de tiempo [57 aC-670 dC], aportando así datos que mejoran la curva de variación secular de referencia con la que se trabajó.

Así entonces fue posible resolver las interrogantes objetivo que se plantearon para el desarrollo de esta tesis, pues el método con el que se trabajó, es un método robusto basado en teorías sólidas, como lo son la teoría electromagnética y el paleomagnetismo. La aplicación del método permite obtener fechas usando hipótesis necesarias y suficientes, las cuales son la variabilidad espacial y temporal del campo magnético terrestre, y la existencia de minerales magnéticos que son capaces de guardar por cientos y hasta millones de años ésta variabilidad temporal, los estudios arqueomagnéticos permiten resolver uno de los grandes problemas de la arqueología, el cual es el: **¿cuándo?**

Esta disciplina se robustece por medio de su aplicación constante, es decir, cada que se obtiene un dato de tiempo el cual es comparado con otros métodos y arroja una fecha, esta es empleada par complementar a la curva de variación secular la cual es la curva maestra de referencia de la variación temporal del campo magnético, la cual se emplea y se empleara para seguir datando material arqueológico, el cual abunda en un

país como México en donde las culturas prehispánicas tuvieron un desarrollo muy extenso y en la actualidad lleno de interrogantes.

# Referencias

---

Beramendi-Orosco, L.E., Gonzalez-Hernandez G., Urrutia-Fucugauchi, J., Manzanilla, L. R., Soler-Arechalde Ana M., Goguitchaishvili A., Jarboe, N. 2009. High-resolution Chronology for the Mesoamerican Urban Center of Teotihuacan Derived from Bayesian Statistics of Radiocarbon and Archaeological Data, *Quaternary Research*, Volume 71, Issue 2, March 2009, pp 99-107

Butler, Robert 1992. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Boston Blackwell Scientific Publications.

Caballero-Miranda, C. 2011. La fábrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS). Monografía No. 16. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México.

Cabrera, R. 1998. La cronología de la Ciudadela en su secuencia arquitectónica en *Los ritmos de cambio en Teotihuacan: reflexiones y discusiones de su cronología*, R. Brambila y R. Cabrera (eds.) Instituto Nacional de Antropología e Historia, Ciudad de México, pp: 143-166.

Dunlop, D.J., 1979. On the Use of Zijderveld vector diagrams in multicomponent paleomagnetic studies. *Phys. of Earth and Planetary Interiors*, 20, pp.12-24

Eighmy, J y Robert Stenberg, 1990. *Archaeomagnetic Dating*. The University of Arizona Press.

Fisher, R. A. 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society*. Vol. A.217, London, pp. 295-305.

Halls, H.C. 1976. A Least-Squares Method to find Remanence Direction from Converging Remagnetization Circles, *Geophys. J.R. astr. Soc.* 45, pp. 297-304.

- Hueda, Y. 2000. Fechamiento arqueomagnéticos de estucos de los sitios de Teopancazco, Teotihuacan y Templo Mayor, Tenochtitlan. Tesis de Licenciatura en Arqueología, ENAH., México, 128 pp.
- Hueda, Y., A.M. Soler-Arechalde, J. Urrutia-Fucugauchi, L. Barba, L. Manzanilla, M. Rebolledo & A. Goguitchaishvili, 2004. Archaemagnetic studies in central México – dating of Mesoamerican lime-plasters. *Phys. Earth & Planet. Int.* 147, pp. 269-283.
- Instituto Nacional de Antropología e Historia. 2009. Boletines de Arqueología: Confirman lazos de dos culturas. Versión electrónica: <http://www.inah.gob.mx/index.php/boletines/17-arqueologia/3826-confirman-lazos-de-dos-culturas>
- Kirchvink, J.L., 1980. The Least- Square line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J.R. astr. Soc.* 62, pp. 699-718
- Lannos, P., 2004. Bayesian inference of calibration curves: application to archaeomagnetism. In: C.E: Buck and A.R. Millard, Editors. Chapter 3. Tools for constructing Chronologies Crossing Disciplinary Boundaries, vol. 177. Series: Lecture Notes in Statistics, Springer-Verlag, London, pp. 43-82.
- Lattman, A.G., H.P. Schwarcz y D.C. Ford, 1986. The paleomagnetism and U-Th dating of Mexican stalagmite, DASD2. *Earth and Planetary Science letters*, vol. 79, Elsevier, Amsterdam. Pp. 195-207
- Le Goff, M., Gallet, Y., Genevey, A., Warmé, N., 2002. On archaeomagnetic secular variation curves and archeomagnetic dating. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 4160, 1-9.
- Manzanilla, L. R. 2006. Proyecto “Teotihuacan: elite y gobierno. Excavaciones en Xalla y Teopancazco” en *Boletín del Consejo de Arqueología*, INAH: [http://www.inah.gob.mx/index\\_html/](http://www.inah.gob.mx/index_html/) Investigación, Coordinación Nacional de Arqueología, Boletín, p. 4

Manzanilla, L. R. 2007. Las casas nobles de los barrios de Teotihuacan: estructuras exclusionistas en un entorno corporativo. Memoria 2007. El Colegio Nacional, México.

Manzanilla, Linda R., Estibaliz Aguayo y Metzli Hernández 2011. Informe técnico final del salvamento de un conjunto con materiales teotihuacanos en Xalasco, Alzayanca, Tlaxcala 2008, Consejo de Arqueología del INAH

Manzanilla, L. R. 2011. Sistemas de control de mano de obra y del intercambio de bienes suntuarios en el corredor teotihuacano hacia la Costa del Golfo en el Clásico. Anales de Antropología, vol. 45, IIA-UNAM, México.

Matos-Moctezuma, E. 2003, La arqueología de Teotihuacan. Arqueología Mexicana, Num. 64, INAH, México.

Matos Moctezuma, E. 2009. Teotihuacan. Fondo de Cultura Económica y Colegio de México. México.

Millon, R. 1973 The Teotihuacan Map. Text. *Urbanization at Teotihuacan, Mexico*. University of Texas Press, Austin

Noel, M. y Batt, C., 1990. A method for correcting geographically separated remanence directions for the purpose of archaeomagnetic dating. *Geophysics Journal International*, 102, pp. 753-756

Rattray, Evelyn Ch. 1991. Fechamientos por radiocarbono en Teotihuacan. *Arqueología*. México. Num. 6, pp: 3-19.

- Solanes-Carraro, M.S. y E. Vela. 2000. Atlas del México Prehispánico. Arqueología Mexicana, Num. Esp. 5, INAH, México
- Soler-Arechalde, A. M., F. Sánchez, M. Rodríguez, C. Caballero-Miranda, A. Goguitchaishvili, J. Urrutia-Fucugauchi, L. Manzanilla, and D. H. Tarling, 2006 b. Archaeomagnetic investigation of oriented pre-Columbian lime-plasters from Teotihuacan, Mesoamerica. *Earth Planets & Space*, Vol. 58 (No. 10), pp. 1433-1439.
- Spence, Michael W. 1981. Obsidian production and the state of Teotihuacan. *American Antiquity*. Vol. 46, No. 4, pp:769-788.
- Sugiyama, S. 1998. Cronología de sucesos ocurridos en el Templo de Quetzalcóatl, Teotihuacán en *Los ritmos de cambio en Teotihuacan: reflexiones y discusiones de su cronología*, R. Brambila y R. Cabrera (eds.) Instituto Nacional de Antropología e Historia, Ciudad de México, pp: 167-184.
- Tauxe, Lisa, 2010. Essentials of Paleomagnetism. University of California Press: <http://magician.ucsd.edu/Essentials/>
- Urrutia, J. 1996. Paleomagnetic study of the Xitle-Pedregal de San Angel lava flow, southern basin of Mexico. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, vol. 97. Elsevier, Amsterdam, pp. 177-196
- Urrutia, J. 1975. Investigaciones paleo magnéticas y arqueomagnéticas en México, *Anales del Instituto de Geofísica* no. 21, UNAM, México, pp. 27-34.
- Wolfman, D., 1990. Mesoamerican chronology and archaeomagnetic dating, AD 1-1200. In *Archaeomagnetic dating* Eghmy, J.L. y R.S. Sternberg editors, University of Arizona Press, Tucson.

Wolfman, D.,1973. A re-evaluation of Mesoamerican chronology : AD 1-1200. Tesis de Doctorado, Colorado University, 293 pp.