



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO EN EL  
ABRIGO ROCOSO LOS GRIFOS, CHIAPAS;  
SITIO DE OCUPACIÓN TEMPRANA EN  
AMÉRICA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**F Í S I C A**

**P R E S E N T A:**

**DANIELA JULIA FREGOSO URRUTIA**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. ANA MARÍA SOLER ARECHALDE**

**2010**



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.

## Hoja de Datos del Jurado

<p>1. Datos del alumno Apellido paterno: Fregoso Apellido materno: Urrutia Nombre(s): Daniela Julia Teléfono: 20650020 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Carrera: Física Número de cuenta: 302839106</p>
<p>2. Datos del tutor Grado: Dra. Nombre(s): Ana María Apellido paterno: Soler Apellido materno: Arechalde</p>
<p>3. Datos del sinodal 1 Grado: Dr. Nombre(s): Gerardo Apellido paterno: Carmona Apellido materno: Ruiz</p>
<p>4. Datos del sinodal 2 Grado: Dr. Nombre(s): Guillermo Apellido paterno: Acosta Apellido materno: Ochoa</p>
<p>5. Datos del sinodal 3 Grado: Dr. Nombre(s): José Luis Apellido paterno: Ruvalcaba Apellido materno: Sil</p>
<p>6. Datos del sinodal 4 Grado: M. en C. Nombre(s): José Daniel Apellido paterno: Flores Apellido materno: Gutiérrez</p>
<p>7. Datos del trabajo escrito Título: Estudio Arqueomagnético en el Abrigo Rocoso Los Grifos, Chiapas; Sitio de Ocupación Temprana en América Número de páginas: 124 p. Año: 2010</p>

---

## AGRADECIMIENTOS

---

A mis padres Javier y Julia, gracias por ser cómo son, gracias por acompañarme y apoyarme en mis aventuras y proyectos por más descabellados que pudiesen parecer. A mi hermano Javier que aún llegando tarde ha sido un gran hermano.

A Steffen por haber coincidido. Gracias por todo el apoyo durante la carrera y en la revisión de éste trabajo. Mi amigo, mi complemento y mi futuro.

A mi abuela María Eugenia, mi tía Teté y mi tío David quiénes se me fueron mucho antes de lo que hubiese deseado y muchísimo antes de que los terminara de necesitar. Los pienso, los siento y los amo.

A aquellas personitas sumamente importantes para mí. A Alejandra, doce años de amistad y contando, una de las personas más brillantes que conozco y cuyo ejemplo siempre me ha motivado a ser mejor. A Cristina y Adriana quiénes me han demostrado que el concepto cursi de encontrar hermanas no genéticamente vinculadas es posible.

A las personas maravillosas que conocí en la Facultad de Ciencias, maestros y amigos para toda la vida. A Rodrigo y Samanta, compañeros de carrera, servicio social y tesis. A Julio por todos esos desvelos y jalones de pelo desde primer semestre.

Un especial agradecimiento a la Dra. Soler, por ser mi tutora y sobretodo por haberme brindado su amistad. Por ayudarme a mantener la calma cuando la desesperación y la ansiedad llegaban. Gracias Ane, ha sido un placer trabajar y reír contigo.

Al Dr. Guillermo Acosta por haberme brindado su confianza y permitirme ser parte del proyecto. De igual forma a todos los arqueólogos con los que conviví durante las dos temporadas de campo, por el buen rato que pasamos y el conocimiento que compartieron conmigo.

Al Dr. Gerardo Carmona, Dr José Luis Ruvalcaba y al M en C. Daniel Flores por haber sido parte del jurado de ésta tesis. Por las valiosas observaciones y aportaciones que realizaron al trabajo.

A mi Universidad Nacional Autónoma de México por todo lo que me ha dado, es un orgullo ser parte de ella y toda la vida trataré de enaltecer sus valores y significado.

Agradezco al apoyo financiero que recibí para la elaboración de esta tesis por parte del Proyecto Cazadores del Trópico Americano del Dr. Guillermo Acosta, financiado con fondos del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) y de la beca de tesista por parte del Instituto de Geofísica de la UNAM.

*“The advance of science is limited not by  
nature’s unwillingness to reveal but by  
man’s inability to comprehend”*  
Charles Best

---

# ÍNDICE

---

<b>RESUMEN</b>	1
<b>INTRODUCCIÓN</b>	2
<b>CAPÍTULO 1. BASES DEL MÉTODO PALEOMAGNÉTICO</b>	4
<b>1.1 La física del paleomagnetismo</b>	4
1.1.1 Dipolos y momentos magnéticos	4
1.1.2 Campo magnético	5
1.1.3 Magnetización y susceptibilidad magnética	8
<b>1.2 Campo magnético terrestre</b>	8
1.2.1 Introducción	8
1.2.2 Elementos del campo magnético terrestre	9
1.2.2.1 <i>Describiendo el campo magnético terrestre</i>	10
1.2.2.2 <i>Descripción con armónicos esféricos</i>	11
1.2.3 Modelo del campo dipolar, geocéntrico y axial (GAD)	13
1.2.4 Campo geomagnético presente	14
1.2.4.1 <i>Variaciones espaciales y temporales</i>	16
1.2.4.1.1 <i>Variación secular</i>	16
1.2.4.1.2 <i>Inversas del campo geomagnético</i>	18
1.2.5 Origen del campo geomagnético	18
<b>1.3 Magnetismo en las rocas</b>	19
1.3.1 Tipos de magnetización	20
1.3.2 Suceptibilidad magnética en los materiales	22
1.3.2.1 <i>Diamagnetismo</i>	23
1.3.2.2 <i>Paramagnetismo</i>	24
1.3.2.3 <i>Ferromagnetismo</i>	24
1.3.2.3.1 <i>Ferromagnetismo, antiferromagnetismo y ferrimagnetismo</i>	25
1.3.2.3.2 <i>Histéresis</i>	26
1.3.3 Minerales magnéticos en las rocas	27
<b>CAPÍTULO 2. ARQUEOMAGNETISMO</b>	29
<b>2.1 ¿Qué es el arqueomagnetismo?</b>	29
2.1.1 Aplicaciones	30
<b>2.2 Método arqueomagnético</b>	30
2.2.1 Recolección de muestras	31
2.2.1.1 <i>Evaluación de la muestra potencial</i>	31
2.2.1.2 <i>Obtención de muestras in situ</i>	32
2.2.2 Preparación de los especímenes	35
2.2.3 Medición	35
2.2.3.1 <i>Magnetómetro de Giro</i>	36

2.2.3.2 <i>Desmagnetizador de Campos Alternos</i>	37
2.2.4 Procesamiento	38
2.2.4.1 <i>Diagrama de Zijderveld</i>	38
2.2.4.2 <i>Estadística de Fisher</i>	39
2.2.5 Fechamiento	41
<b>CAPÍTULO 3. CONTEXTO ARQUEOLÓGICO</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Introducción</b>	<b>42</b>
<b>3.2 Prehistoria de América</b>	<b>43</b>
3.2.1 Modelos de Poblamiento	43
3.2.2 Región tropical del sureste mexicano	46
3.2.2.1 Cazadores asociados con puntas acanaladas	47
3.2.2.2 Cazadores del trópico americano	49
<b>3.3 El sitio; Los Grifos, Ocozacoautla de Espinosa, Chiapas</b>	<b>51</b>
3.3.1 Entorno Geográfico	51
3.3.2 Precedentes de Excavaciones	52
3.3.3 Excavaciones en Los Grifos en el marco del Proyecto Cazadores del Trópico Americano	54
<b>CAPÍTULO 4. OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS</b>	<b>61</b>
<b>4.1 Muestreo</b>	<b>61</b>
4.1.1 Temporada 2007	62
4.1.2 Temporada 2008	63
4.1.3 Temporada 2009	65
<b>4.2 Preparación de los especímenes y medición</b>	<b>67</b>
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS</b>	<b>68</b>
<b>4.1 Análisis de las muestras</b>	<b>68</b>
4.1.1 LG01	69
4.1.2 LG02	72
4.1.3 LG03	76
4.1.4 LG04	80
4.1.5 LG05	85
4.1.6 LG10	89
<b>4.2 Fechamiento Arqueomagnético</b>	<b>93</b>
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES</b>	<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>104</b>
<b>APÉNDICE</b>	<b>110</b>

---

## RESUMEN

---

En este trabajo se realizó un estudio arqueomagnético del Abrigo Rocosos Los Grifos en Chiapas, México. Los Grifos es un sitio con una temporalidad desde la transición Pleistoceno-Holoceno hasta ocupaciones más tardías en el Clásico Medio y el Posclásico.

Se fecharon 5 muestras del sitio; dos de ellas para las ocupaciones más tardías y tres para las más tempranas. Para la muestra LG01 se obtuvieron 3 fechamientos:  $1060 \pm 30$  años d.C,  $1175 \pm 15$  años d.C,  $1415 \pm 30$  años d.C, todas correspondiendo al período Posclásico coincidiendo así con los estudios de cerámica. La muestra LG02 se obtuvo la fecha de  $1480 \pm 20$  años d.C., también en los límites del Posclásico. Para las muestras LG01 y LG02 se utilizó la curva de Variación Secular de Mesoamérica para realizar los fechamientos.

Las muestras LG04 y LG05, tomadas del mismo cuadro de excavación sólo que la última un nivel estratigráfico inferior, se fecharon en  $8,800 \pm 100$  años a.p.<sup>1</sup> que corresponde a inicios de la época geológica en la que nos encontramos actualmente, el Holoceno. La muestra LG10 se fechó en  $8,950 \pm 250$  años a.p. Para estas últimas muestras se utilizó una curva de Variación Secular de 4,000 a 16,000 años a.p. construida en base a datos volcánicos y a sedimentos lacustres. Consideramos estos fechamientos satisfactorios ya que por estudios radiométricos la ocupación más temprana de Los Grifos se había definido entre  $8930 \pm 150$  y  $9540 \pm 150$  años a.p.

Estos datos obtenidos servirán para complementar los estudios arqueológicos en Los Grifos y para mejorar la curva de variación secular de México para inicios del Holoceno.

Las muestras fueron medidas y procesadas en el LIMNA de la unidad de la UNAM en Morelia, Michoacán y el Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica de la UNAM.

---

<sup>1</sup> Antes del presente.

---

# INTRODUCCIÓN

---

El conocimiento que se tiene sobre el poblamiento temprano de América es aún muy limitado, esto debido a las dificultades que presenta su estudio. La forma de vida de los grupos cazadores recolectores -su ocupación temporal del espacio, su tecnología perecedera compuesta principalmente por materiales líticos y óseos- hace complicada la tarea de localizar sitios asociados a dicha temporalidad.

En lo que respecta a nuestro país, no fue sino hasta el siglo XIX y más concretamente en el XX que se comenzaron a estudiar sitios prehistóricos. La mayoría de los estudios se han hecho en el área norte del país, esto se debe principalmente a las características físicas del terreno que permite indentificar más fácilmente posibles sitios tempranos. Los estudios en regiones tropicales de nuestro país han sido mínimos<sup>2</sup>, en parte debido a las pocas probabilidades que se le daba a que grupos humanos pudiesen habitar en ese tipo de ambientes sin la implementación de la agricultura (Bailey *et al.*, 1989).

Es debido al poco interés por la región tropical de México que surge el proyecto Cazadores del Trópico Americano (PCTA) en el cuál esta tesis aportará sus resultados. El proyecto PCTA (2004 - actualmente) que está dirigido por el Dr. Guillermo Acosta Ochoa del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM, retoma las investigaciones de Richard MacNeish y Frederick Peterson (1959) en el área de centro-occidental de Chiapas y más específicamente los trabajos del extinto Departamento de Prehistoria del INAH en los abrigos rocosos de Santa Marta y Los Grifos (1974-1979). El objetivo del proyecto PCTA es reconocer una o más poblaciones en la región centro-occidental de Chiapas que precedan o sean contemporáneas a las poblaciones asociadas a puntas acanaladas (puntas “Clovis” y “cola de pescado”) del resto del continente y poder relacionarlos con *el modo de vida de los cazadores recolectores del trópico americano*, propuesto por Luis Felipe Bate (Bate, 1983), para los grupos tempranos de la región septentrional de Sudamérica. El proyecto incluyó temporadas de prospección para localizar sitios<sup>3</sup> en los municipios de Ocozocoautla, Cintalapa y Jiquipilas, la excavación de la cueva La Encañada y los abrigos rocosos de Santa Marta y Los Grifos (Acosta, 2004, 2006, 2008 y 2009)

El Abrigo Rocoso Los Grifos, localizado en el municipio de Ocozocoautla de Espinosa en el estado de Chiapas, se ha fechado por métodos radiométricos entre  $8930\pm 150$  y  $9540\pm 150$  años a.p (Santamaría y García-Bárcena, 1989) para su ocupación más temprana.

Los Grifos está asociado a cazadores de puntas acanaladas al encontrarse una punta “Clovis” con tradición tecnológica de Norteamérica y dos fragmentos de puntas “cola de pescado” asociadas a Sudamérica. Este hecho tiene implicaciones en las teorías de poblamiento americano y su investigación cobra importancia.

---

<sup>2</sup> Principalmente en las Tierras Altas.

<sup>3</sup> Localizándose así más de 30 sitios arqueológicos, muchos de ellos en abrigos rocosos y cuevas, sitios con gráfica rupestre y talleres-cantera de pedernal (Acosta, 2009).

El objetivo principal de ésta tesis es determinar la época de ocupación de Los Grifos mediante el arqueomagnetismo y de ésta forma colaborar con su estudio. Debido a que es el primer estudio arqueomagnético que se realiza para un sitio de ocupación temprana en México, sus resultados permitirán mejorar su curva de variación secular para este período.

---

# CAPÍTULO 1. BASES DEL MÉTODO PALEOMAGNÉTICO

---

El paleomagnetismo es el estudio del campo magnético en el pasado. La forma en la se puede estudiar las configuraciones pasadas del campo magnético terrestre es a través de las manifestaciones observables en la materia presente.

Para entender el paleomagnetismo es necesario conocer los principios en los que se basa:

1. Nuestro planeta posee un campo magnético y éste tiene variaciones espaciales y temporales.
2. Debido a la organización interna de los átomos que conforman toda la materia, existen dipolos magnéticos cuya orientación puede modificarse a efecto de un campo magnético exterior.

En este capítulo se expondrán los conceptos principales en los que se sustenta el paleomagnetismo.

## 1.1 La Física del paleomagnetismo

### 1.1.1 Dipolos y momentos magnéticos

Pensemos en un imán de barra con el cuál hemos estado familiarizados toda nuestra vida. Sin tener ningún conocimiento especial sabíamos que tiene dos polos diferentes, uno que atraía y otro que repelía a objetos metálicos y a otros imanes parecidos. Si uno de estos imanes de barra lo cortábamos por la mitad la intuición nos guiaba a pensar que un lado, el norte por ejemplo, mantendría sus propiedades atrayentes antes probadas, y el otro lado, el sur, mantendría sus propiedades repulsivas. Sin embargo esto fallaba, ya que ahora ambas mitades presentaban de nuevo un polo atractivo (-) y otro repulsivo (+). Formalmente esto se encuentra enunciado en la ley de Gauss, presentada en las ecuaciones de Maxwell.  $\vec{B}$  es el vector de inducción magnética<sup>1</sup>.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.1)$$

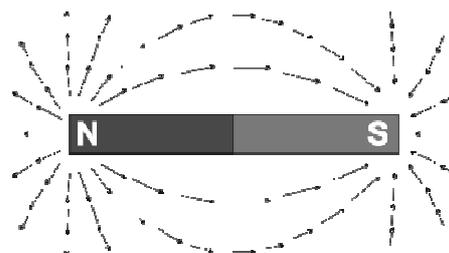


Figura 1.1. Líneas de campo de un dipolo

---

<sup>1</sup> Ver la sección 1.1.2

Las líneas de campo magnético que van de un polo al otro de nuestro imán imaginario deben ser cerradas, por lo tanto el **dipolo magnético** es la unidad más pequeña de carga magnética; los monopolos magnéticos parecen no existir en la naturaleza, salvo por fracciones de segundo. Los dipolos magnéticos son resultado del movimiento de los electrones en las órbitas atómicas y del mismo momento magnético del núcleo en cuestión.

Para definir el concepto de **momento magnético** pensemos en un dipolo,  $m$  será la magnitud de la carga,  $\vec{l}$  será el vector que conecta ambos polos. El momento magnético  $\vec{m}$  queda definido como:

$$\vec{m} = m\vec{l} \quad (1.2)$$

Para una espira de área  $A$  con una corriente eléctrica  $I$ , el momento magnético es

$$\vec{m} = IA\hat{n} \quad (1.3)$$

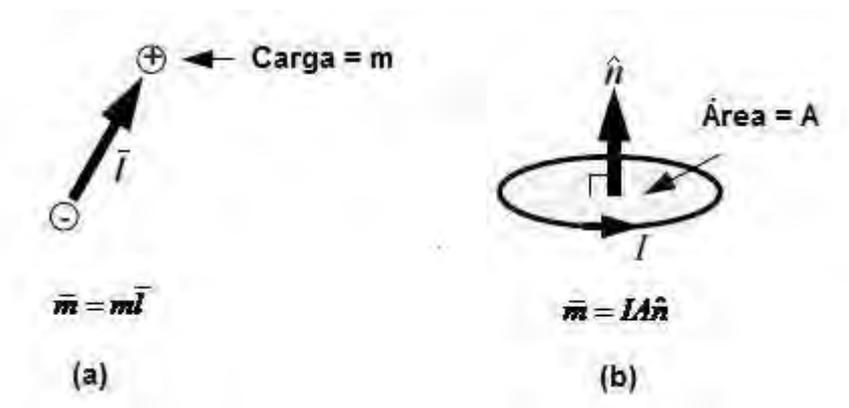


Figura 1.2 . a) Momento magnético en un dipolo. b) Momento magnético en una espira (Modificado de Butler, 1992)

Donde  $\hat{n}$  es el vector unitario perpendicular al plano de la espira. La unidad del momento magnético en el Sistema Internacional es  $\text{Am}^2$ .

Las partículas elementales están provistas con sus propios momentos magnéticos y estos son los que originan las propiedades magnéticas de la materia.

### 1.1.2 Campo Magnético

El campo magnético al igual que el gravitacional es intangible; sólo nos damos cuenta de su existencia por los efectos que tiene sobre la materia que se encuentra inmersa en éste.  $\vec{H}$  es el vector de campo magnético. La dirección del campo en cualquier punto estará dado por las líneas de flujo y su fuerza o intensidad dependerá de la cercanía de las mismas.

En la figura 1.3 se muestra un momento magnético  $\vec{m}$  inmerso en un campo magnético  $\vec{H}$ .  $\vec{\Gamma}$  es el vector torca de alineación y expresado por el producto vectorial  $\vec{\Gamma} = \vec{m} \times \vec{H}$ , por lo tanto es perpendicular al plano que contiene al dipolo y al campo magnético.

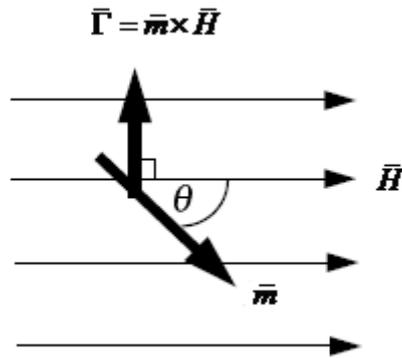


Figura 1.3 Momento magnético  $\bar{m}$  inmerso en un campo magnético  $\bar{H}$ .  $\bar{\Gamma}$  es el vector torca de alineación y expresado por el producto vectorial  $\bar{\Gamma} = \bar{m} \times \bar{H}$ , por lo tanto es perpendicular al plano que contiene al dipolo y al campo magnético.  $\theta$  es el ángulo entre  $\bar{m}$  y  $\bar{H}$  (Modificado de Butler, 1992).

Los momentos magnéticos inmersos en un campo magnético si se encuentran libres tenderán a alinearse con él. Esto se debe a que todos los sistemas buscan estados de mínima energía. Para nuestro sistema de un momento magnético dentro de un campo magnético esta energía está determinada por la siguiente expresión:

$$E = -\bar{m} \cdot \bar{H} = -mH \cos \theta \quad (1.4)$$

En rango de  $\theta$  es de  $(0^\circ, 180^\circ)$ , y el mínimo de energía por tanto se alcanza cuando  $\theta = 0^\circ$ , que quiere decir que el momento magnético esté alineado con el campo.

La ecuación de Maxwell relativa al campo magnético es la siguiente:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (1.5)$$

Donde  $\bar{J}$  es la densidad de corriente eléctrica y  $\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$  es la densidad de corriente eléctrica de desplazamiento.

La **inducción magnética**  $\bar{B}$  es el flujo magnético por unidad de área de una sección normal a la dirección del flujo. Tiene unidades de teslas (T) en el Sistema Internacional.

Debido a que  $\bar{B}$  es la referente a cargas en movimiento es la más aceptada actualmente, aunque para nuestros fines vamos a despreciar la diferencia y tanto  $\bar{H}$  y  $\bar{B}$  se van a referir al campo magnético. La relación entre  $\bar{H}$  y  $\bar{B}$  es la siguiente:

$$\bar{B} = \mu_0 (\bar{H} + \bar{M}) \quad (1.6)$$

Con  $\mu_0$  que es la permeabilidad del vacío o también conocida como constante magnética<sup>2</sup> y  $\vec{M}$  la magnetización.

Visto dinámicamente, el campo magnético es una región del espacio donde una carga eléctrica puntual  $q$  desplazándose a una velocidad  $\vec{v}$  sufre la acción de una fuerza  $\vec{F}$  que es perpendicular a su vector de velocidad y al vector de inducción magnética  $\vec{B}$ . Ésta fuerza es la denominada **fuerza de Lorentz**.

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.7)$$

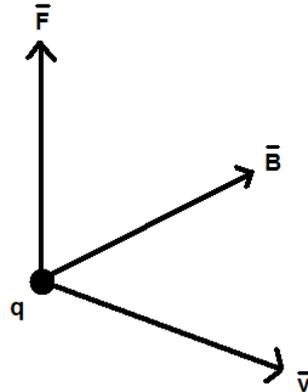


Figura 1.4 . Fuerza de Lorentz. Una carga  $q$  desplazándose en un campo magnético  $\vec{H}$  sufre una fuerza que es perpendicular al vector de velocidad  $\vec{v}$  y al vector de inducción magnética  $\vec{B}$

Por lo anterior podemos inferir que corrientes eléctricas generan campos magnéticos. Supongamos una hoja de papel donde esparcimos limadura de hierro y la atravesamos con un alambre. Si generamos una corriente eléctrica a través del alambre podremos observar como la limadura de hierro se alinea con las líneas de campo magnético.

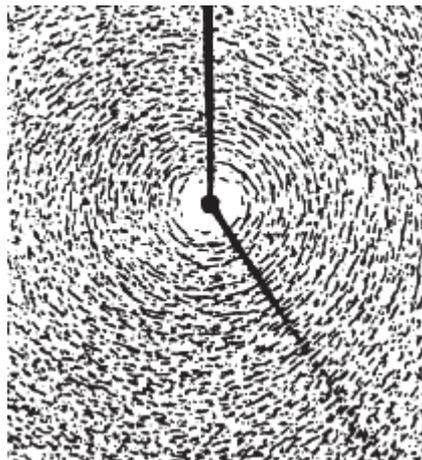


Figura 1.5 . Campo magnético generado por una corriente eléctrica. Se observa el alineamiento de limadura de hierro con las líneas de campo magnético al generar una corriente eléctrica a través del alambre (Modificado de Tauxe, 2005)

---

<sup>2</sup>  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$

### 1.1.3 Magnetización y susceptibilidad magnética

El grado de alineación de los momentos magnéticos por unidad de volumen se muestra en la siguiente expresión.

$$\bar{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_i m_i \quad (1.8)$$

Siendo  $m_i$  el momento del  $i$ -ésimo átomo y  $\Delta v$  el elemento de volumen. Al vector  $\bar{M}$  se le conoce como **magnetización** y nos proporciona una descripción macroscópica de las corrientes atómicas internas de la materia. Sus unidades en el Sistema Internacional son  $\text{Am}^{-1}$ .

**La susceptibilidad magnética**  $\chi_m$  se define como la capacidad que tiene un material para magnetizarse cuando se encuentra inmerso en un campo magnético  $\bar{B}$ .

La susceptibilidad magnética está asociada al spin del electrón y a su movimiento alrededor de las órbitas atómicas. Al ser una medida de la magnetización, la susceptibilidad puede ser expresada por

$$\bar{M} = \chi_m \bar{B} \quad (1.9)$$

## 1.2 Campo magnético terrestre

### 1.2.1 Introducción

Las propiedades magnéticas de los materiales han sido de gran interés para la humanidad a lo largo de su historia. Se le atribuyen a Tales de Mileto, en el siglo VI a.C., las primeras observaciones de atracción de materiales ligeros al frotar resina fosilizada contra lana.

Hacia el siglo XI se tiene el reporte de la primer brújula en China (Needham, 1965), que consistía en una aguja magnetizada, esto se conseguía frotando su punta con magnetita<sup>3</sup>, que se colgaba en las embarcaciones por medio de fibra de seda. Es difícil imaginar el desarrollo de la humanidad sin el invento de la brújula debido a las implicaciones que tuvo para la navegación y con esto las exploraciones de nuevas tierras. En ese tiempo se pensaba que la orientación de aquella brújula primitiva era debido a la estrella polar, no se relacionaba con la Tierra misma.

Gerhard Mercator realizó observaciones sobre las declinaciones del campo magnético terrestre y con esto en 1546 llegó a la conclusión de que las agujas no se orientaban con la estrella polar ni ningún punto externo a la Tierra, sino era algo dentro de nuestro mismo planeta lo que las direccionaba (Merrill *et al.*, 1996).

---

<sup>3</sup> Mineral ferrimagnético cuya composición es  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

El geomagnetismo es el estudio del campo magnético terrestre, se enfoca en tratar de entender y describir su origen, morfología y sus variaciones espaciales y temporales.

Desde hace aproximadamente 500 años se han hecho mediciones del campo magnético terrestre en diferentes sitios del planeta (Jonkers, 2003). De dichas mediciones se han podido obtener conclusiones como que la inclinación del campo magnético terrestre depende de la latitud geográfica y que éste ha sufrido inversiones a lo largo del tiempo.

## 1.2.2 Elementos del Campo magnético terrestre

Hemos visto que el campo magnético se genera a partir de cargas en movimiento. Algunos planetas del sistema solar poseen campo magnético, aunque sus orígenes sean distintos, y le sirven al planeta para protegerse del viento solar. Por ejemplo el campo magnético de Júpiter y Saturno tiene su origen en una delgada capa de hidrógeno comprimido por inmensas presiones hasta formar una sopa de protones y electrones que gira alrededor de un pequeño núcleo sólido.

El campo magnético terrestre está mayormente originado de la misma forma alrededor del núcleo sólido pero a consecuencia de movimientos convectivos de hierro y níquel<sup>4</sup> en estado líquido en el llamado núcleo externo. A esta contribución se le conoce como **campo geomagnético** y corresponde al modelo de un dipolo geocéntrico que detallaremos más adelante. Se le conoce también como campo dipolar y representa un 80% del campo magnético en la superficie de la Tierra (Merrill *et al.*, 1996)

Existen otras 3 contribuciones al campo magnético terrestre:

- Campo magnético cortical que es originado por rocas magnetizadas en la corteza de la Tierra.
- Campo externo producido por corrientes eléctricas en la ionósfera y en la magnetósfera, debido a la interacción de la radiación electromagnética solar y el viento solar con el campo magnético terrestre. (Lanza *et al.*, 2006)
- Campo magnético resultado de un proceso de inducción electromagnética generado por corrientes eléctricas inducidas en la corteza y en el manto superior debido a las variaciones de tiempo del campo magnético externo. (Lanza *et al.*, *ídem*)

Las últimas contribuciones corresponden al campo no-dipolar geomagnético y representan un 20% del campo magnético terrestre (Merrill *et al.*, 1996).

---

<sup>4</sup> Además de otros elementos ligeros pero desconocidos.

### 1.2.2.1 Describiendo el campo geomagnético

El vector que define al campo magnético en un punto de la superficie se puede determinar a partir de dos ángulos, la declinación y la inclinación magnéticas y su magnitud que será la intensidad.

- La declinación (D): Es el ángulo que forma la componente horizontal del vector del campo magnético con el norte geográfico medido en grados y a favor de las manecillas del reloj. Está definida en el rango de  $[0^\circ, 360^\circ]$ .
- La inclinación (I): Es el ángulo que forma el vector de campo magnético con el plano horizontal medido en grados. Está definida en el rango de  $[-90^\circ, 90^\circ]$ .
- La intensidad (H): es la magnitud del vector total medida en Teslas (T).

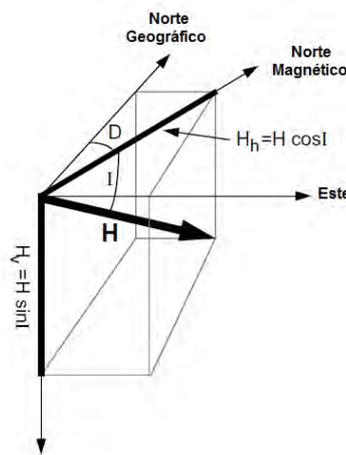


Fig 1.6. Ángulos que determinan el vector de campo magnético terrestre en un punto (Modificado de Butler, 1992)

El vector de campo magnético tiene entonces cuatro componentes, una vertical, una horizontal, una norte y una este que se expresan a continuación

$$H_v = H \sin I$$

$$H_h = H \cos I$$

$$H_n = H \cos I \cos D$$

$$H_e = H \cos I \sin D$$

$$(1.10)$$

La intensidad total del campo estará dada por :

$$H = \sqrt{H_n^2 + H_e^2 + H_v^2} \quad (1.11)$$

### 1.2.2.2 Descripción con armónicos esféricos

La representación del campo magnético en la superficie terrestre se puede obtener utilizando armónicos esféricos.

Las dos ecuaciones de Maxwell que se relacionan al campo magnético son

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (1.12)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (1.13)$$

$\bar{J}$  es la densidad de corriente eléctrica y  $\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$  es la densidad de corriente de desplazamiento eléctrico .

La región desde la superficie terrestre hasta los 50 km, en ausencia de tormentas eléctricas puede tomarse como vacío electromagnético (Merrill *et al.*, 1996) , por lo que para la región que nos interesa podemos suponer  $\bar{J} = 0$  y  $\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = 0$  . De esta forma la ecuación (1.12)

resulta  $\nabla \times \bar{H} = 0$ , lo que significa que  $\bar{H}$  es un campo vectorial conservativo y por tanto existe un potencial escalar  $\psi$  tal que

$$\bar{H} = -\nabla \psi \quad (1.14)$$

Por encima de la superficie terrestre se tiene que

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} \quad (1.15)$$

Y siguiendo 1.13 se obtiene que de la misma manera

$$\nabla \cdot \bar{H} = 0 \quad (1.16)$$

Combinando esto con (1.1) se obtiene que el potencial escalar  $\psi$  debe satisfacer la ecuación de Laplace

$$\nabla^2 \psi = 0 \quad (1.17)$$

El potencial escalar<sup>5</sup>  $\psi$  puede representar el campo magnético en la superficie terrestre si cumple con (1.17).

En coordenadas esféricas la ecuación de Laplace toma la siguiente forma

---

<sup>5</sup> La unidad de este campo escalar estará en Teslas.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin\theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} = 0 \quad (1.18)$$

Donde  $r$  es la distancia desde el centro de la Tierra,  $\theta$  es la colatitud<sup>6</sup> y  $\phi$  la longitud.

Una solución para esta ecuación la podemos obtener por separación de variables como

$$\psi = \frac{U(r)}{r} P(\theta) Q(\phi) \quad (1.19)$$

Para el campo geomagnético, el potencial escalar en coordenadas esféricas es:

$$\psi(r, \theta, \phi) = \frac{a}{\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l P_l^m(\cos\theta) \left[ \left( (g_e)_l^m \left( \frac{r}{a} \right)^l + (g_i)_l^m \left( \frac{a}{r} \right)^{l+1} \right) \cos m\phi + \left( (h_e)_l^m \left( \frac{r}{a} \right)^l + (h_i)_l^m \left( \frac{a}{r} \right)^{l+1} \right) \sin m\phi \right] \quad (1.20)$$

Donde  $a$  es el radio medio de la Tierra, los coeficientes  $g$  y  $h$  son llamados coeficientes de Gauss y deben ser evaluados partir de observaciones y unidades de nT (unidades de inducción magnética). El subíndice “e” indica cual fracción del potencial está asociado con un origen externo ( $r > a$ ), de igual forma el subíndice “i” indica la fracción del potencial que está asociado a un origen interno ( $r < a$ ).  $P_l^m$  son funciones parcialmente normalizadas de Schmidt asociados a polinomios de Legendre.

Los coeficientes de (1.20) son típicamente obtenidos usando varios conjuntos de observaciones de X, Y, Z donde

$$X = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \quad Y = -\frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial \psi}{\partial \phi}, \quad Z = \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (1.21)$$

y luego resolviendo por los coeficientes.

La importancia relativa de las fuentes internas y externas puede ser determinada al truncar la serie para un valor fijo de  $l$ . Los coeficientes determinados de dicha manera varían con el tiempo, como los cambios en las corrientes ionosféricas y los cambios asociados a las corrientes eléctricas inducidas en la corteza y el manto superior y corrientes en el núcleo, llevando así a cambios en el campo magnético en la superficie terrestre (Merrill *et al.*, 1996).

Los análisis llevados a cabo desde 1830s por Gauss muestran que los términos relacionados con un origen externo tienen una amplitud mucho menor, casi insignificante, que los términos relacionados con un origen interno<sup>7</sup> (Lanza *et al.*, 2006), por lo que se puede concluir que el potencial, y por tanto el campo magnético terrestre, tiene un origen interno.

Escribiendo finalmente el potencial que representa el campo magnético terrestre sólo dado por la contribución interna

<sup>6</sup> Grados medidos desde el polo norte, esto es 90° menos la latitud.

<sup>7</sup> Términos a primer orden ( $l=1$ ).

$$\psi = \frac{a}{\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} P_l^m(\cos \theta)(g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi) \quad (1.22)$$

Las contribuciones de origen interno se pueden pensar como dipolos geocéntricos que están alineado con tres diferentes ejes:

- $g_1^0$  que corresponde al eje rotacional
- $g_1^1$  que corresponde al eje ecuatorial que intersecta al ecuador en el meridiano de Greenwich
- $h_1^1$  que corresponde al eje ecuatorial que intersecta al ecuador a  $90^\circ$  este.

### 1.2.3 Modelo de campo dipolar, geocéntrico y axial (DGA)

Como hemos visto, el campo magnético se puede asumir como un dipolo magnético situado en el centro de la Tierra y alineado con el eje de rotación de la misma, ya que las contribuciones externas (no dipolares), son insignificantes al ser comparadas con las contribuciones internas (dipolares). Esta aproximación equivale al llamado modelo de campo dipolar, geocéntrico y axial (DGA), principio básico del paleomagnetismo.

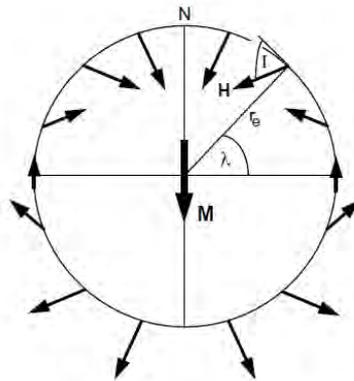


Figura 1.7. Modelo del dipolo geocéntrico y axial.  $\lambda$  es la latitud geográfica,  $r_e$  es el radio medio terrestre,  $M$  el dipolo magnético,  $i$  la inclinación y  $N$  el norte geográfico (Butler, 1992).

Para este modelo las componentes horizontal y vertical están dadas respectivamente por

$$H_h = \frac{M \cos \lambda}{r_e^3} \quad (1.23)$$

$$H_v = \frac{2M \sin \lambda}{r_e^3}$$

Donde  $\lambda$  es la latitud geográfica,  $r_e$  es el radio medio terrestre y  $M$  el dipolo magnético.

La magnitud del campo está expresada por:

$$H = \sqrt{H_h^2 + H_v^2} = \frac{M\sqrt{1+3\text{sen}^2\lambda}}{r_e^3} \quad (1.24)$$

Podemos relacionar la inclinación del campo con la latitud geográfica

$$\tan I \left( \frac{H_v}{H_h} \right) = \left( \frac{2\text{sen}\lambda}{\cos\lambda} \right) = 2 \tan \lambda \quad (1.25)$$

La ecuación anterior es conocida como la ecuación del dipolo. La inclinación magnética será la latitud geográfica  $\lambda$  ( $-90^\circ$  en el polo sur y  $+90^\circ$  en el polo norte) por un factor de 2. Para este modelo la declinación magnética será igual a cero en todos los puntos.

### 1.2.4 Campo geomagnético presente

Existen otras implicaciones que sufriría el campo si en verdad se comportara como el modelo DGA.

- El campo sería rotacionalmente simétrico con respecto al eje de rotación y por tanto las líneas de campo magnético siempre apuntarían hacia el norte.
- Las líneas de campo magnético estarían más juntas en los polos y más separadas en el ecuador, provocando que el campo en los polos tuviese el doble de intensidad que en el ecuador. (Tauxe, 2005)

Sin embargo, cuando el campo geomagnético es promediado en el tiempo, el modelo DGA representa una aproximación bastante plausible.

El vector suma de los dipolos geocéntricos, presentado al final de la sección 1.2.4, es el dipolo que representa más adecuadamente al campo magnético actual y está inclinado  $11.5^\circ$  con respecto al eje de rotación terrestre. El *polo norte geomagnético* es el punto donde el eje de este dipolo atraviesa la superficie terrestre en el hemisferio norte y el *polo sur geomagnético* el punto correspondiente en el hemisferio sur.

Por otro lado, el *polo sur y norte magnéticos*<sup>8</sup> corresponden a los puntos donde el campo es vertical,  $I=90^\circ$  y  $I=-90^\circ$  respectivamente. El ecuador magnético es la isoclima correspondiente a la  $I=0^\circ$ . En el caso en que el campo geomagnético terrestre fuera exactamente representado por el dipolo geocéntrico inclinado, los polos geomagnéticos y los magnéticos coincidirían (Butler, 1992).

---

<sup>8</sup> También conocidos por la literatura en inglés como *dip poles*.

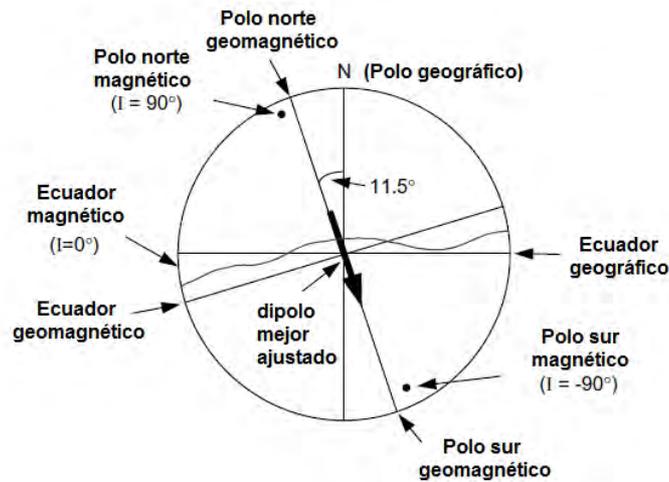


Figura 1.8 . Dipolo mejor ajustado inclinado 11.5°. Se muestran los diferentes polos y ecuadores magnéticos, geomagnéticos y geográficos. (Modificado de Butler, 1992)

Si se observa la dirección del campo geomagnético a una cierta latitud y longitud terrestres, el *polo virtual geomagnético (VGP)* será el punto donde un dipolo imaginario que corresponda a dicha dirección del campo atraviese la superficie de la Tierra. Los VGPs nos sirven para conocer si los polos geomagnéticos han cambiado con el tiempo (variaciones temporales) o si un pedazo de corteza terrestre ha rotado con respecto al polo geomagnético (variaciones espaciales). Si promediamos polos magnéticos antiguos de al menos 10,000 años lo que obtendremos será un polo paleomagnético (Tauxe, 2005).

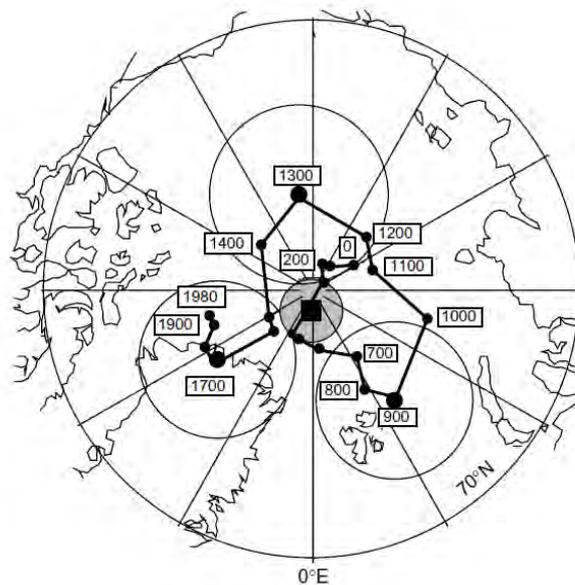


Figura 1.9. Posiciones del polo norte geomagnético durante 2000 años (Butler, 1992)

### 1.2.4.1 Variaciones espaciales y temporales

La dirección e intensidad del campo geomagnético sufre cambios a lo largo del tiempo, variaciones que van de intervalos desde milisegundos hasta millones de años. En la tabla se presenta un resumen de las variaciones que sufre el campo geomagnético.

Variación	Tiempo (s)	Causa
Muy cortas	$3 \times 10^{-1} - 3 \times 10^1$	Asociadas al campo externo
Micropulsaciones		
Variaciones subacústicas		
Tormentas magnéticas	$1 \times 10^2$	Asociadas al campo externo
Variación Diurna		
Variación Secular	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{10}$	Campo dipolar y no dipolar
Variación en el momento dipolar magnético	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{10}$	Campo dipolar
Excursiones	$1 \times 10^{14}$	Inversiones abortadas
Variaciones en intensidad	$3 \times 10^{11}$	Campo dipolar
Paleovariación Secular	$3 \times 10^{12}$	Campo no dipolar y variaciones en el dipolo
Cambios de Polaridad	$3 \times 10^{14}$	Campo dipolar y no dipolar interno

Tabla 1.1 . Resumen de variaciones espaciales y temporales del campo geomagnético con su duración y causa (Soler, 2006)

La intensidad del campo dipolar ha sufrido una tasa de decremento del 5% por siglo desde el análisis de Gauss en 1835 (Merrill *et al.*, 1996).

Las variaciones que nos van a interesar más para el contexto paleomagnético serán la variación secular y los cambios de polaridad, que se detallaran a continuación.

#### 1.2.4.1.1 Variación Secular

El campo magnético terrestre presenta cambios en declinación, inclinación e intensidad a lo largo del tiempo. Las variaciones que van de 1 a  $10^5$  años se conocen como *variación secular geomagnética*. Se presume que la variación secular tiene su origen en el movimiento del núcleo fluido (cambios en el campo dipolar), mientras que las variaciones de períodos cortos tienen su origen en fuentes externas (cambios del campo no-dipolar).

En la Figura 1.10 se muestran los registros históricos de las direcciones del campo geomagnético en las ciudades de Londres en Inglaterra y Boston y Baltimore en los Estados Unidos.

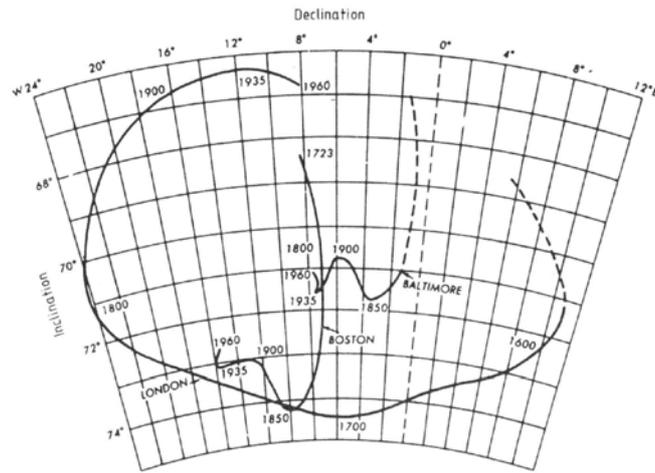


Figura 1.10 . Variaciones seculares de la declinación e inclinación en Londres, Boston y Baltimore (modificado de Jacobs, 1994)

Se puede observar que los patrones de variación secular de las ciudades de Estados Unidos difieren con a de Londres. La variación secular es un fenómeno global pero presenta diferencias a nivel regional, por lo que es necesario realizar curvas de variación secular por áreas o bloques tectónicos (Soler, 2006) . Ésta observación probablemente refleja el tamaño de las fuentes no dipolares del campo geomagnético dentro del núcleo terrestre (Butler, 1992). El arqueomagnetismo ha contribuido con completar gráficas de variación secular alrededor del mundo.

La Tabla 1.2 resume las características de la variación secular que se han obtenido tanto por observaciones geomagnéticas como por resultado de estudios paleo y arqueomagnéticos.

El momento dipolar decrece anualmente un 0.05% .

El eje dipolar realiza una precesión hacia el oeste de 0.08° por año.

El dipolo presenta un desplazamiento hacia el norte del orden de 2 km por año.

El campo no dipolar sufre una deriva hacia el oeste de 0.2°-0.3° por año <sup>9</sup>.

Una variación en la intensidad (incremento o decremento) del campo dipolar a una razón promedio de 10 nT por año.

El arqueomagnetismo no ha podido confirmar la existencia de la deriva hacia el oeste del campo no-dipolar y por tanto sugiere que no es una característica de la variación secular (Lanza, 2006)

El campo fluctua en dirección e intensidad pero si se promedia en 100 años se puede aproximar al modelo DGA

Resultados de observaciones geomagnéticas

Resultados de estudios paleo y arqueomagnéticos

Tabla 1.2. Resumen de las características de la variación secular

<sup>9</sup> Asociado con una posible pero no especificada deriva hacia el sur.

#### 1.2.4.1.2 Inversas del campo geomagnético

A escalas de tiempo más grandes que las consideradas para la variación secular<sup>10</sup>, se ha observado que el campo dipolar geomagnético ha cambiado su polaridad. La magnetización inversa fue descubierta por David (1904) y Brunhes (1906) en el Macizo Central Francés, comparando la dirección de magnetización del material quemado por el flujo de lava con la de arcilla de capas inferiores. Lo que encontraron fue que las capas superiores estaban magnetizadas de forma normal<sup>11</sup> y las inferiores de forma inversa. Estudios subsecuentes en otras partes del mundo<sup>12</sup> han confirmado la inversión de la polaridad del campo.

Durante un cambio de polaridad la dirección del campo geomagnético varía alrededor de 180°. Existen dos interpretaciones para esto, la primera es resultado de un decremento del campo dipolar principal de manera que el campo observado es dominado por la componente no dipolar. Una consecuencia de ésta interpretación es que debido al comportamiento del campo no dipolar, las transiciones del polo no se esperarían que fueran iguales en diferentes lugares al mismo tiempo o en el mismo lugar a diferentes tiempos. La segunda interpretación es que el campo sólo daría un giro de 180° pero sería aún dominado por el término dipolar variando independientemente la componente axial y ecuatorial, de forma que se podrían observar mismos caminos de transición en cualquier punto de la Tierra.

Es necesario observar inversiones en las direcciones del campo de manera global antes de poder considerar que el campo ha sufrido una inversa (Merrill *et al.*, 1996), es debido a esto que tomamos la segunda interpretación y definimos una **inversa del campo geomagnético** como un cambio de 180° del campo dipolar promediado en algunos miles de años.

La polaridad se mantiene constante por períodos del orden de 100,000 años a 1 millón de años (Lanza, 2006). La última inversa bien documentada ocurrió hace 700,000 años, aunque existe evidencia de inversas menores que pudieron haber ocurrido hace 100,000 y 40,000 años (Sternberg, 1990).

### 1.2.5 Origen del campo geomagnético

Aún con lo que conocemos sobre las características del campo geomagnético, lo que lo origina no ha conseguido ser explicado satisfactoriamente. La teoría que mejor puede explicar el origen del campo magnético terrestre por el momento es la del dínamo magneto-hidrodinámico.

Para acercarnos a la teoría del dínamo magnetohidrodinámico se necesita entender primero el modelo de un dínamo auto-excitado. El modelo consiste en un disco de cobre rotando en un eje eléctricamente conductor. Una torca, que asumimos constante, debe aplicarse para rotar el disco con velocidad angular  $\omega$  en presencia de un campo  $\vec{H}$  que apunta hacia arriba y es perpendicular al disco. Los electrones en el disco de cobre experimentan una fuerza de Lorentz. El borde del disco está en contacto con un solenoide circular que atrapa la corriente eléctrica  $I$  que se genera a partir de la fuerza de Lorentz y que va hacia afuera del disco. La otra parte del solenoide está en contacto con el eje conductor. Este sistema

---

<sup>10</sup> Ver tabla 1.1.

<sup>11</sup> Entendiéndose la magnetización normal como la producida por la dirección del campo actual.

<sup>12</sup> Islandia (Dagley *et al.*, 1967), Goelandia, Islandia y Australia (Mercanton, 1926)

representa un dínamo auto excitado porque mientras el disco siga girando, la corriente eléctrica fluirá y el campo inicial puede ser removido.

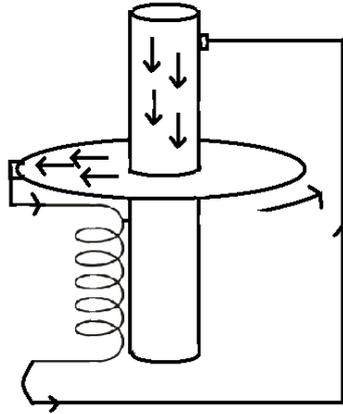


Figura 1.11 . Dínamo auto-excitado

Este modelo tiene todos los elementos del dínamo auto-excitado

- Un conductor eléctrico, representado por el disco de cobre.
- Un campo magnético inicial.
- Interacción entre el campo magnético y el conductor, esta interacción la provee el solenoide cerrando el circuito.
- Debido a las pérdidas de resistividad eléctrica, se tiene que proveer de energía al sistema.

Es necesario que el modelo del origen del campo también explique las observaciones del campo magnético presente, y como vimos en la sección anterior, es necesario explicar la inversión en la polaridad. El dínamo hidrodinámico si cumple con esto, ya que es invariante de la polaridad del campo dipolar, aunque esto no significa que se haya entendido plenamente el mecanismo que produce las inversiones.

El centro de la Tierra opera como un dínamo magnetohidrodinámico auto-excitado debido a las interacción entre el campo magnético y el hierro y níquel en el núcleo externo produciendo una retroalimentación positiva. Para equilibrar la pérdida de resistividad eléctrica y con eso garantizar que el campo no disminuya, los movimientos del fluido en el núcleo externo deben regenerar el campo magnético<sup>13</sup>. La proporción dominante del campo geomagnético es de forma dipolar y lo que queda es de tipo no dipolar y tiene su origen en las corrientes turbulentas del hierro y níquel dentro del núcleo cerca de la frontera con el manto.

### 1.3 Magnetismo en las rocas

Las propiedades magnéticas de la materia dependen del hecho de que las partículas elementales son provistas de su propio momento magnético. El momento magnético de un cuerpo con extensión finita está dado por el vector suma de los momentos magnéticos de

---

<sup>13</sup> Para razonables conductividades eléctricas, viscosidad del fluido y movimientos convectivos del fluido plausibles.

los átomos que lo conforman. El momento total puede ser nulo debido a que los momentos de los átomos se cancelan los unos a los otros.

### 1.3.1 Tipos de magnetización

Para una muestra macroscópica con un momento magnético neto, una dirección preferencial de alineación debe existir para los momentos microscópicos. Existen dos fenómenos que pueden generar una **magnetización en las rocas**; campo magnético externo y fuerzas de interacción magnéticas entre los electrones (Lanza,2006) .

- Campo Magnético externo: La mayoría de los momentos individuales estarán alineados con el campo magnético externo ( $\vec{H}$ ) en un instante determinado de tiempo. Esta alineación ocurre ya que corresponde a un mínimo en la energía potencial del sistema. Sin embargo existen vibraciones causadas por la energía térmica que dispersan los momentos individuales al azar. (Lanza, 2006). Una fracción de los momentos estará alineada con el campo y esta fracción dependerá de la intensidad del campo. A la magnetización generada por este fenómeno se le conoce como **magnetización inducida**.
- Fuerzas de interacción magnéticas entre los electrones: Se puede originar una magnetización  $\vec{M}$  ya que debido a la densidad de algunas sustancias cristalinas se produce una fuerte interacción entre los momentos magnéticos de los electrones en el sistema y causar con esto una alineación espontánea. (Lanza, 2006). A la magnetización producida por este fenómeno se le conoce como **magnetización remanente** y tiene la cualidad de ser permanente, esto es que se mantiene aún cuando el campo magnético externo es removido.

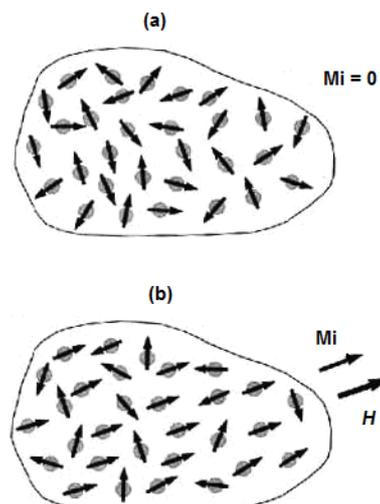


Figura 1.12. Momentos magnéticos atómicos en un sólido (a) Orientaciones al azar variando de un instante a otro, el momento magnético neto es cero b) Una fracción de los momentos magnéticos atómicos se alinearán con el campo externo aplicado. (Modificado de Lanza, 2006)

La magnetización remanente que más nos va a interesar en el arqueomagnetismo es la magnetización termoremanente. Cuando un material se enfría desde una temperatura por encima de la temperatura de Curie en un campo magnético externo, como el campo magnético terrestre, va a adquirir una magnetización remanente que se conoce como **magnetización termoremanente (TRM)**. Para materiales ferromagnéticos (i.e, óxidos de

hierro), la **temperatura de Curie** es la temperatura a la cual el ordenamiento magnético se destruye, esto quiere decir que la magnetización remanente del material se pierde. Si se calientan los materiales a temperaturas menores que la de Curie no se borrarán todas las magnetizaciones remanentes (Sternberg, 1990).

Para materiales ferrimagnéticos como la magnetita y antiferromagnéticos, la temperatura a la cual se pierde la magnetización es la llamada **temperatura de Néel**. Sin embargo como convención en el paleomagnetismo se va a utilizar la temperatura de Curie para materiales ferrimagnéticos y antiferromagnéticos también (Merrill, 1996). Para la magnetita con la que comúnmente se trabaja en el arqueomagnetismo, la temperatura de Curie es de 580°C (Sternberg, 1990). En la sección 1.3.2.3.1 se explicarán los materiales ferromagnéticos, antiferromagnéticos y ferrimagnéticos a mayor detalle.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de otras magnetizaciones remanentes importantes y sus principales características.

<b>Tipos de magnetización remanente</b>	<b>Principales características</b>
Magnetización termoremanente (TRM)	La magnetización remanente adquirida por una muestra que se enfría desde una temperatura superior a la de Curie en un campo magnético externo <sup>14</sup>
Magnetización química remanente (CRM)	Adquirida durante un cambio químico en un campo magnético externo
Magnetización viscosa remanente (VRM)	Adquirida durante un largo período de tiempo en un campo magnético externo
Magnetización remanente isothermal (IRM)	Adquirida en un corto período de tiempo a una cierta temperatura en un campo magnético externo usualmente fuerte
Magnetización deposicional remanente (DRM)	Adquirida por sedimentos cuyos granos se asientan sin agua en presencia de un campo magnético externo
Magnetización post-deposicional remanente (post-DRM)	Adquirida por procesos físicos que causan traslación o rotación de granos de sedimento luego de la deposición

Tabla 1.3. Principales magnetizaciones remanentes

La magnetización en las rocas la podemos dividir en dos grupos; **Magnetización primaria** y **magnetizaciones secundarias**.

- La **magnetización primaria** se refiere a aquella adquirida en el momento de formación de la roca. Esta magnetización será paralela al campo magnético externo<sup>15</sup> en el que se encuentre el material y nos proporcionará por lo tanto información acerca de la dirección y de la intensidad del campo magnético en el momento de la formación de la roca.
- **Las magnetizaciones secundarias** son las adquiridas por las rocas posteriormente a su formación.

<sup>14</sup> Usualmente débil como el de la tierra.

<sup>15</sup> Asumiendo este campo magnético externo como el campo magnético terrestre  $\vec{H}$ .

La magnetización que se mide primero en el laboratorio corresponde a la **magnetización natural remanente (NRM)**. El mecanismo mediante el cual la NRM fue adquirida depende de su formación, la historia subsecuente de las rocas así como las características de sus minerales magnéticos, esto quiere decir que consiste de una magnetización primaria y magnetizaciones secundarias. Una tarea indispensable para las investigaciones paleomagnéticas es reconocer, corregir y preferentemente eliminar componentes secundarios mientras que se preservan los suficientes componentes primarios para la medición (McElhinny, 1973).

Magnetizaciones primarias son usualmente TRM en rocas ígneas<sup>16</sup> y DRM, post-DRM o CRM en rocas sedimentarias<sup>17</sup> (Merrill *et al.*, 1996).

### 1.3.2 Suceptibilidad Magnética en los materiales

De acuerdo con la suceptibilidad magnética ( $\chi_m$ ) los materiales pueden ser clasificados bajo tres categorías:

- a) Materiales diamagnéticos:
  - Susceptibilidad magnética :  $\chi_m < 0$  y  $\chi_m \ll 1$
  - Permeabilidad :  $\mu < \mu_0$
- b) Materiales paramagnéticos:
  - Susceptibilidad magnética :  $0 < \chi_m \ll 1$
  - Permeabilidad :  $\mu > \mu_0$
- c) Materiales ferromagnéticos:
  - Susceptibilidad magnética :  $\chi_m > 0$  y  $\chi_m \rightarrow \infty$
  - Permeabilidad :  $\mu \gg \mu_0$

La permeabilidad  $\mu$  se define como la facilidad que ofrece un cierto material al paso del flujo magnético .

---

<sup>16</sup> Se forman a partir de la solidificación de magma.

<sup>17</sup> Se forman por la acumulación y consolidación de materia mineral pulverizada o sedimentos.

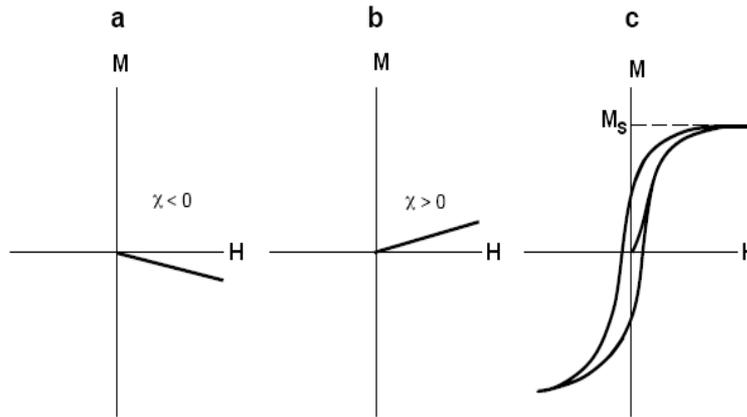


Figura 1.13. Relación entre la magnetización y el campo de los diferentes tipos de materiales.  
a) materiales diamagnéticos b) materiales paramagnéticos c) materiales ferromagnéticos ( Modificado de Butler, 1992).

### 1.3.2.1 Diamagnetismo

Si todos los orbitales de una molécula están completados, los momentos magnéticos de los electrones se cancelan los unos a los otros y el momento total es nulo (Lanza *et al.*, 2006). Un material compuesto de átomos sin momentos magnéticos atómicos se clasifica como material diamagnético.

Para los materiales diamagnéticos la aplicación de un campo magnético externo altera los movimientos orbitales de los electrones y adquiere una magnetización ( $\bar{M}_i$ ) de forma antiparalela al campo magnético aplicado. La magnetización producida es muy pequeña para ser observada macroscópicamente.

$$\bar{M}_i = \chi_m \bar{B} \quad (1.26)$$

La susceptibilidad magnética es una cantidad negativa adimensional, característica de cada material e independiente de la temperatura.

$$\chi_m = -\frac{(NZ\mu_0 e^2 (r^2))}{6m_e} \quad (1.27)$$

N es el número de átomos por unidad de volumen, Z es el número de electrones del átomo, e es la carga del electrón<sup>18</sup>, r es el radio de la órbita electrónica y  $m_e$  es la masa del electrón<sup>19</sup>.

Algunos de estos materiales son el agua, cobre, cloruro de sodio y el cuarzo. La mayoría de los compuestos inorgánicos y prácticamente todos los compuestos orgánicos son materiales diamagnéticos (Purcell, 1963). El diamagnetismo es independiente de la temperatura.

<sup>18</sup>  $e = -1.602564 \times 10^{-19} C$

<sup>19</sup>  $m_e = 9.10 \times 10^{-31} kg$

### 1.3.2.2 Paramagnetismo

Los materiales paramagnéticos contienen átomos con momentos magnéticos atómicos<sup>20</sup> y la relación entre la magnetización ( $\bar{M}_i$ ) y el campo aplicado es positiva. En los sólidos paramagnéticos, los momentos magnéticos atómicos reaccionan independientemente a campos magnéticos aplicados y a la energía térmica (Butler, 1992). Cuando la temperatura se mantiene mayor que el zero absoluto, la energía térmica hace vibrar al material causando que los momentos magnéticos atómicos oscilen rápidamente en diferentes orientaciones, con lo que la magnetización media es cero. En la ausencia de un campo magnético aplicado, los momentos atómicos estarán igualmente distribuidos en todas las direcciones y se obtendrá una magnetización resultante  $\bar{M}_i = 0$ .

Bajo la presencia de un campo magnético externo, los efectos dispersores de la temperatura son contrastados con el torque ejercido por el campo<sup>21</sup> sobre los momentos magnéticos individuales y el equilibrio se obtiene (Lanza *et al.*, 2006).

La magnetización inducida corresponde en este caso a

$$\bar{M}_i = NmL(\alpha) \quad (1.28)$$

El grado de alineación depende de la razón de la energía magnética sobre la energía térmica  $\alpha = mB / KT$ .  $L(\alpha) = \coth(\alpha) - 1/\alpha$  corresponde a la función de Langevin. Es positiva y disminuye cuando la temperatura aumenta.

En cualquier situación geológicamente razonable,  $\alpha < 10^{-6}$ . La función de Langevin es lineal para  $\alpha \ll 1$  con  $L(\alpha) \approx \alpha/3$  y podemos reescribir 1.28 como

$$\bar{M}_i = NmL(\alpha) = Nm\alpha/3 = \chi_m B \quad (1.29)$$

La magnetización producida es por tanto paralela al campo. La susceptibilidad magnética en este caso es positiva e inversamente proporcional a la temperatura absoluta.

Algunos de estos materiales son el sodio, el aluminio y el cloruro de cobre.

### 1.3.2.3 Ferromagnetismo

Los **materiales ferromagnéticos** al igual que los paramagnéticos tienen átomos con momentos magnéticos, la diferencia recae en que para estos los momentos atómicos adyacentes interactúan fuertemente. Esta interacción fuerte con sus vecinos produce que la magnetización para materiales ferromagnéticos sea órdenes de magnitud más grande que para los materiales paramagnéticos. Para los materiales paramagnéticos la susceptibilidad magnética es pequeña comparada con los materiales ferromagnéticos.

---

<sup>20</sup> Sin embargo no hay interacción entre momentos atómicos adyacentes.

<sup>21</sup> La magnetización se reduce a cero cuando el campo magnético se retira.

Los materiales ferromagnéticos contienen elementos de transición<sup>22</sup> por lo que su red cristalina es suficientemente densa causando una superposición parcial entre los orbitales de iones contiguos y éstos por lo tanto tienden a compartir sus electrones. Las fuerzas de interacción están originadas al alinear los momentos de spin magnético de los electrones. Actúan en distancias del orden de  $\mu m$  formando **dominios magnéticos**<sup>23</sup>. Dentro de un dominio, los momentos del espín son mutuamente paralelos y producen un momento magnético espontáneo aún en la ausencia de un campo magnético externo. La intensidad de las fuerzas de intercambio depende de las distancias interatómicas dentro de la red cristalina y ésta aumenta de forma directamente proporcional con la temperatura de tal forma que la superposición entre orbitales contiguos se reduce y por tanto las fuerzas de intercambio también son reducidas. A la temperatura de Curie tales fuerzas de intercambio se igualan a cero (Lanza *et al.*, 2006).

Conforme a lo anterior podemos definir a los materiales ferromagnéticos como los que presentan una magnetización espontánea. La magnetización espontánea se reduce a cero en el punto de Curie y por encima de la temperatura asociada a dicho punto la sustancia se comporta como una sustancia paramagnética (McElhinny, 1973).

#### 1.3.2.3.1 Ferromagnetismo, Antiferromagnetismo y ferrimagnetismo

Dependiendo de la sustancia, las fuerzas de intercambio pueden actuar directamente entre dos cationes contiguos o a través de un anión interpuesto entre ellos. En el primer caso se tienen **sustancias ferromagnéticas *sensu stricto*** y para el segundo dependiendo del número de cationes involucrados se pueden dividir en **sustancias antiferromagnéticas** y **ferrimagnéticas**<sup>24</sup>.

En las **sustancias ferromagnéticas *sensu stricto*** sus momentos de espín son mutuamente paralelos y concordantes, imparten un momento magnético total al dominio. Algunos ejemplos de este tipo de sustancias son el hierro (Fe), níquel (Ni) y cobalto (Co). En las **sustancias antiferromagnéticas** las dos sub-redes tienen la misma intensidad y por tanto sus magnetizaciones, con igual magnitud y en direcciones opuestas, se cancelan. El dominio en general tiene un momento magnético igual a cero. Ejemplos de estas sustancias son la ulvoespinela ( $Fe_2TiO_4$ ), ilmenita ( $FeTiO_3$ ) y troilita ( $FeS$ ). En las **sustancias ferrimagnéticas** las dos sub-redes tienen magnetizaciones diferentes por lo que la resultante ya no es diferente de cero y tendrá un momento magnético. A este grupo pertenece la magnetita ( $Fe_3O_4$ ). En la figura 1.14 Se pueden observar el acoplamiento de los espines de los electrones para los tres casos anteriormente citados.

---

<sup>22</sup> Como Fe, Co, Ni, Gd y Dy.

<sup>23</sup> También conocidos como dominios Weiss.

<sup>24</sup> Existe otro caso que es el de sustancias antiferromagnéticas imperfectas (o parasíticas), donde las redes cristalinas no son exactamente paralelas. Un ejemplo de esta es la hematita ( $\alpha - Fe_2O_3$ ).

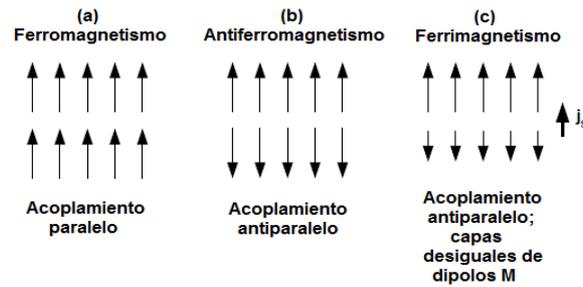


Figura 1.14. Acoplamiento de los espines en materiales ferromagnéticos (a), antiferromagnéticos (b) y ferrimagnéticos (c) (Modificado de Butler, 1992)

### 1.3.2.3.2 Histéresis

Los materiales diamagnéticos y paramagnéticos siguen una relación lineal entre la magnetización y el campo. Cuando una sustancia ferromagnética, inicialmente en un estado desmagnetizado<sup>25</sup>, se coloca en un campo  $\vec{H}$ , el material va a seguir la curva descrita por la figura 1.15 y a ésta se le conoce como **curva de histéresis**. Las curvas de magnetización no son iguales cuando aumenta el campo que cuando se disminuye, existe una falta de reversibilidad en el proceso. Cuando se remueve el campo magnético, la magnetización no regresa a cero sino que graba un recuerdo del campo magnético al que fue expuesto anteriormente. La histéresis permite la existencia de imanes permanentes de gran potencia.

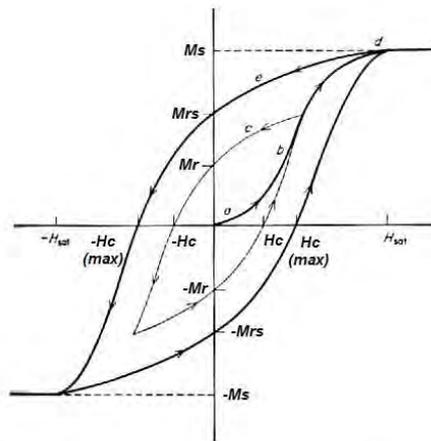


Figura 1.15 Curva de histéresis para materiales ferromagnéticos.  $M_s$  es la magnetización de saturación,  $H_c$  la coercitividad,  $M_r$  la magnetización remanente y  $M_{rs}$  la magnetización remanente de saturación (modificado de McElhinny, 1973)

Observemos la figura 1.15, la sección “a” se considera reversible, esto es que si el campo se reduce a cero regresa exactamente a su punto de origen (donde está desmagnetizado), si se continua aumentando el campo hasta la sección “b” y si es ese punto se reduce el campo a cero, el material no regresará al origen sino que seguirá la curva trazada por “c” y va a resultar en una **magnetización remanente  $M_r$** <sup>26</sup>. Si se aumenta el campo mas allá del punto d ya no se va a producir un incremento en la magnetización, por lo que dicho límite

<sup>25</sup> En el estado desmagnetizado, la magnetización espontánea de los dominios en un cristal están acomodados en un patrón regular relacionado a los ejes del cristal, pero con sus direcciones cancelándose la una a la otra (Irving, 1964)

<sup>26</sup> Más específicamente una magnetización remanente isoterma (IRM). Ver Tabla 1.2

se conoce como **magnetización de saturación** ( $M_s$ ).  $M_{rs}$  es la **magnetización remanente se saturación** que corresponde a  $M_s$ . El campo requerido para mover las paredes del dominio es la **coercitividad**  $H_c$ , este campo es el que mantiene la magnetización.

### 1.3.3 Minerales magnéticos en las rocas

Los minerales causantes de las propiedades magnéticas de las rocas están dentro de la terna de  $FeO-TiO_2-Fe_2O_3$ . En la figura 1.16 se muestra un diagrama para reconocer los diferentes tipos de minerales ferromagnéticos cuyas propiedades varían como una función de su composición. Los minerales más magnéticos son la magnetita ( $Fe_3O_4$ ), la maghaemita ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) y las **titanomagnetitas** que son las soluciones sólidas de magnetita con ulvoespinela ( $Fe_2TiO_4$ ). Los minerales menos magnéticos está basados en hematita ( $\alpha-Fe_2O_3$ ) y sus soluciones sólidas con ilmenita ( $FeTiO_3$ ) y a éstas se les conoce como titanohematitas. Las líneas punteadas corresponden a una razón igual de Fe y Ti y las flechas señalan la dirección de la oxidación. Como se observa, las titanomagnetitas se oxidan hacia las titanohematitas. Para fines prácticos en el arqueomagnetismo nos interesarán muestras que contengan magnetita debido a que la magnetización de la magnetita es 200 veces más fuerte que de la hematita (Eighmy, 1990).

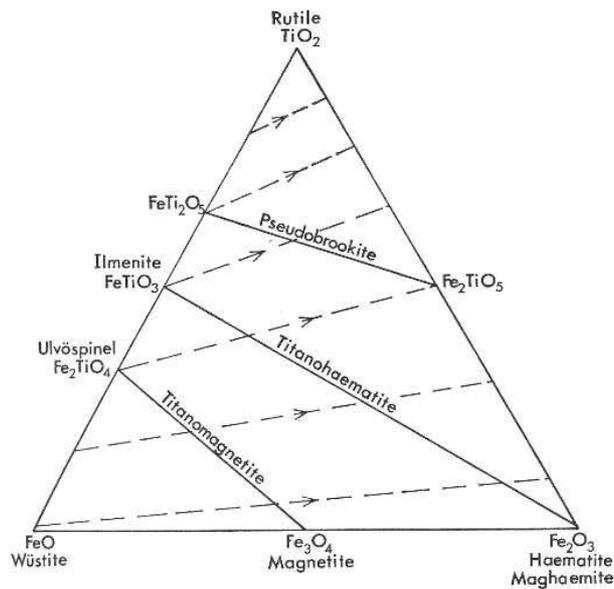


Figura 1.16 Sistema de la terna  $FeO-TiO_2-Fe_2O_3$ . Las líneas punteadas corresponden a una razón igual de Fe y Ti y las flechas señalan la dirección de la oxidación (modificado de McElhinny, 1973)

El tamaño y forma del grano del material pueden en sí tener un efecto significativo en sus propiedades magnéticas. Los granos de los minerales que llevan la remanencia no necesariamente son los mismos que son responsables por las propiedades magnéticas en conjunto (Sternberg, 1990).

Como hemos visto en este capítulo, entre los materiales que forman a las rocas se encuentran sustancias diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas sujetas al campo geomagnético terrestre. La magnetización total de una roca será la suma de las

magnetizaciones inducidas, causadas por el campo geomagnético actual<sup>27</sup> y remanentes, adquiridas sobre tiempos geológicos. Las magnetizaciones remanentes por tanto son una especie de archivo de donde podemos obtener información no sólo de la roca en cuestión, sino sobre la historia del campo geomagnético terrestre mismo.

---

<sup>27</sup> O alguna otra fuente externa.

---

## CAPÍTULO 2. ARQUEOMAGNETISMO

---

En el capítulo anterior revisamos los conceptos más importantes necesarios para entender el paleomagnetismo: La Tierra tiene su propio campo magnético que varía espacial y temporalmente y las rocas lo adquieren tanto al momento de su formación como subsecuentemente. En este capítulo se revisará cómo se aplica lo anterior a un problema arqueológico.

### 2.1 ¿Qué es el arqueomagnetismo?

El arqueomagnetismo es el estudio de objetos y muestras asociadas con sitios arqueológicos al comparar la información magnética grabada en estos materiales, debido al campo magnético terrestre, con las variaciones temporales que éste ha sufrido. El período de tiempo que abarca su campo de estudio se remonta desde la prehistoria hasta la actualidad (Lanza, 2006).

El arqueomagnetismo es un rama del paleomagnetismo ya que utiliza los métodos paleomagnéticos pero con el objetivo de responder preguntas en el campo de la arqueología.

Al igual que el paleomagnetismo, el arqueomagnetismo parte de dos principios fundamentales:

- La Tierra tiene un campo magnético interno con variaciones espaciales y temporales.
- Los minerales magnéticos como óxidos de hierro, magnetita y hematita, que se encuentran en ciertos materiales arqueológicos, son capaces de mantener un registro de la dirección e intensidad del campo magnético terrestre.

En el año 1964 cuando E. Irving escribiera su libro *Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems*, no le daba muchas esperanzas a que el arqueomagnetismo fuera útil para la arqueología en lo que se refiere a proveer fechamientos:

*“It is doubtful whether the method (arqueomagnetismo) is of sufficient precision for it to become a tool of real archeological importance in competition with Carbon 14 dating”* (Irving, 1964).

En la actualidad entre la arqueología y el arqueomagnetismo se ha establecido una relación simbiótica; la arqueología le aporta las muestras, que en algunos casos han sido fechadas ya por otro tipo de métodos, con lo que se construyen y mejoran curvas de variación secular y el arqueomagnetismo le aporta fechamientos con una menor incertidumbre incluso que el Carbono 14.

## 2.1.1 Aplicaciones

En la práctica su principal tarea es proveer fechamientos para los materiales y eventos arqueológicos, pero también puede ser utilizado para estudiar variaciones espacio-temporales del campo geomagnético del área de interés, orientaciones de construcciones, análisis ambiental y exploración (Soler, 2006; Tarling, 2007). En esta tesis sólo nos ocuparemos de la parte de fechamiento, al ser su principal objetivo.

Como se vio en la sección 1.3.3, los minerales responsables de las propiedades magnéticas de las rocas están dentro de la terna de  $FeO - TiO_2 - Fe_2O_3$ . De estos minerales los que se encuentran principalmente en los materiales arqueológicos son la magnetita (material ferrimagnético) y la hematita (material antiferromagnético parasítico). Cuando los materiales ferromagnéticos<sup>1</sup> se calientan por encima de la temperatura de Curie<sup>2</sup> se les borra completamente la remanencia y lo que se obtiene es una magnetización termoremanente (Sternberg, 1990). Cuando materiales arqueológicos como hornos, fogones, comales, temazcales, pisos, techos y muros son expuestos al fuego, guardan al momento de su última exposición la dirección e intensidad del campo magnético presente (Soler, 2006).



Figura 2.1 . Ilustración del proceso de adquisición de magnetización termoremanente en la pared de un horno (Soler, 2006)

## 2.2 Método arqueomagnético

En esta sección se expondrá el método arqueomagnético<sup>3</sup>. Se describirá el método de obtención *in situ* de las muestras, su preparación, medición y procesamiento de los datos para obtener su declinación, inclinación e intensidad característica. Además se explicará cómo se interpretan los datos obtenidos, comparándolos con una curva de variación secular, y obtener así un fechamiento final.

### 2.2.1 Recolección de muestras

<sup>1</sup> Grupo que conforma a los ferromagnéticos *sensu stricto*, antiferromagnéticos y ferrimagnéticos.

<sup>2</sup> En realidad para materiales antiferromagnéticos y ferrimagnéticos es a la temperatura de Néel, pero como ya se explicó en la sección 1.3.1 por convención paleomagnética se toma la temperatura de Curie.

<sup>3</sup> Se puede seguir del método paleomagnética en general.

### 2.2.1.1 Evaluación de la muestra potencial

Una vez que se han planteado los objetivos del estudio arqueomagnético<sup>4</sup> es importante determinar el lugar más propicio para obtener las muestras.

Por observaciones se ha llegado a la conclusión de que la mayoría de los suelos arqueológicos tienen suficiente material ferromagnético para obtener una buena magnetización termoremanente (Eighmy, 1990), sin embargo hay ciertas características a tomarse a consideración a la hora de elegir el lugar de donde se van a tomar nuestras muestras para garantizar, en cierta medida, la obtención de resultados:

- **Textura:** Se refiere a la cantidad de arcilla en la muestra. La cantidad de arcilla se correlaciona positivamente con la retención de magnetismo termoremanente en largos períodos de tiempo, sin embargo aún no se ha establecido algún porcentaje mínimo necesario para la obtención de una buena muestra arqueomagnética (Eighmy, 1990). Una prueba rápida para evaluar el contenido de arcilla en campo es tomar una muestra de suelo del sitio que se eligió para el muestreo y ponerla en agua. Debido a que las partículas de la arcilla son de 0.24 mm aproximadamente, con el contacto del agua se volverá lodosa. Si al cabo de dos minutos en el agua se disuelve la muestra de suelo y el agua se ve clara, la muestra no contiene mucha arcilla.
- **Contenido mineral:** Una forma de evaluar a simple vista el contenido mineral de una muestra potencial es observar su color. Suelos que tienen contaminación ferromagnética al entrar en contacto con el aire toman una coloración en la gama del naranja, cuando esta oxidación ocurre la hematita se forma. Cuando el material es quemado en una atmósfera reductora se produce magnetita (Eighmy, 1990). La magnetita particularmente produce una coloración oscura y puede ser confundida con suelos sin quemar. Una forma para hacer la distinción es observar la coloración oscura que decrece lejos de la superficie quemada.
- **Grado de quemado:** Se deben buscar muestras que hayan sido quemadas a más de 400°C. Esta determinación para la muestra potencial es imposible de hacer en campo, por lo que el recolector deberá poner en práctica sus capacidades de observación. En general suelos inmediatamente en la superficie de fogones, hornos y habitaciones quemadas estuvieron a la suficiente temperatura para ser buenas muestras arqueomagnéticas (Eighmy, 1990).
- **Dureza:** La dureza es un indicativo de la temperatura a la que estuvo expuesto el suelo. Una prueba rápida de esto es tomar una muestra de suelo y sumergirla en agua, posteriormente se hace una evaluación de su dureza. Que una muestra no sea lo suficientemente dura no significa que no nos sirva, sólo que el método para su obtención difiere. Habrá que hacer un **consolidado** de la muestra, este procedimiento se detallará en la siguiente sección.

---

<sup>4</sup> Como por ejemplo obtener el fechamiento asociado a la quema de algún edificio o la última utilización de un horno.

Las observaciones anteriores son sugerencias, el criterio del especialista en arqueomagnetismo y del arqueólogo se deben poner en práctica para cumplir con los objetivos particulares del fechamiento que se desee hacer.

### 2.2.1.2 Obtención de muestras *in situ*

Una vez que se ha elegido el lugar más idóneo viene la parte de la obtención de muestras.

Una muestra se define como un conjunto de especímenes individuales tomados de un mismo cuadro<sup>5</sup> de la excavación, esto porque se considera que tendrán en común su exposición al fuego y composición. Para garantizar una medida estadística se toman entre 8 y 12 especímenes por muestra.



Figura 2.1 Ejemplo de una muestra compuesta por 9 especímenes (LG05). Los Grifos, Chiapas, México.

Existen 2 métodos de obtener las muestras; colocación de testigos *in situ* u obtención de pisos o paredes completos.

- **Colocación de testigos *in situ*:** En el cuadro ya predeterminado se pega 1 testigo por cada espécimen deseado. El testigo es una circunferencia de madera de 2.54 cm de diámetro y 0.5 cm de alto.
  1. Pegar los testigos. Se limpia primero la superficie con una brocha, posteriormente se utiliza un pegamento epóxico ya que no contiene materiales magnéticos, seca rápido y tiene gran adherencia.
  2. Se mide el rumbo y echado de cada testigo utilizando una brújula. Los métodos para medir la rumbo y echado difieren para muestras de piso y de pared, por lo cuál se detallan a continuación.

<sup>5</sup> O un sitio en particular en su defecto.



Figura 2.2 Partes de la brújula (Soler, 2006)

Piso:

Se coloca la brújula sobre el testigo a marcar . Cuando el ojo de la brújula esté centrado, ayudados por el canto se traza una línea sobre el testigo con plumón permanente . La flecha que trazaremos debe apuntar a donde apunta la pínula de la brújula. El rumbo medido lo veremos en la escala de la brújula<sup>6</sup> . Para tener un buen análisis estadístico los diferentes especímenes tendrán que tener rumbos diferentes.

Para medir el echado paramos la brújula manteniendo el canto sobre la flecha que trazamos anteriormente . Vamos a mover el control del nivel que se encuentra detrás de la brújula, de tal manera que el ojo de buey del clinómetro se encuentre centrado. El valor que nos de la escala del clinómetro será la medición del echado.

Pared:

Se coloca el canto de la brújula haciendo contacto con el testigo. Cuando el ojo de buey de la brújula esté centrado con ayuda del canto se marca una recta sobre el testigo con plumón permanente. De nuevo la punta de la flecha debe estar dirigida a la misma dirección que la pínula de la brújula. El rumbo medido lo veremos en la escala de la brújula.

Para medir el echado paramos de nuevo la brújula , pero esta vez el canto no estará sobre la flecha trazada, sino haciendo un ángulo de 90° con ella . La pínula debe estar a la derecha de la punta de la flecha trazada. De nuevo movemos el control del nivel que se

<sup>6</sup> Cuando la brújula apunte directamente al norte magnético la declinación será cero (aguja de la brújula y pínula deben coincidir).

encuentra detrás de la brújula, de tal manera que el ojo de buey del clinómetro se encuentre centrado. El valor que nos de la escala del clinómetro será el echado.

3. Una vez anotados los rumbos y echados de cada espécimen con ayuda de una pequeña espátula y cincel desprendemos los testigos con material suficiente. Estos se envuelven en algodón, se marca debidamente toda la muestra; fecha de obtención, nombre de la muestra, sitio, unidad de excavación, capa, nivel y cuadro. Posteriormente se empaquetan las muestras y se llevan al laboratorio de procesamiento de muestras.

- **Obtención de pisos o paredes completos:** Se extraen pisos o paredes completas del sitio, se toma el rumbo y echado de toda la muestra y se transporta para obtener los especímenes individuales al laboratorio de procesamiento de muestras.

1. Se va a tomar el rumbo y el echado de todo el piso utilizando la metodología descrita en el paso 2 de la colocación de testigos *in situ*, haciendo la marcación de las flechas esta vez en todo el piso, o pared, que conformará a la muestra. De tal forma se tendrá un solo rumbo y echado por muestra.
2. Con ayuda de una espátula y cincel se extrae la muestra, se envuelve en algodón y se empaca, asegurándose de anotar los datos; fecha de obtención, nombre de la muestra, sitio, unidad de excavación, cuadro, capa y nivel. Se llevan las muestras al laboratorio de procesamiento de muestras.
3. En el Laboratorio de Procesamiento de Muestras se pegan testigos sobre la muestra utilizando el pegamento epóxico, sobre cada testigo se pinta con plumón la flecha que ya habíamos dibujado *in situ* sobre la muestra. Utilizando una espátula se separa cada testigo con material.

## 2.2.2 Preparación de los especímenes

Una vez que se ha llegado a este punto se pueden tratar a los testigos de la misma forma. Lo que se busca debido al tipo de magnetómetro que utilizamos es tener un espécimen que sea un cilindro de 2.1 cm de alto<sup>7</sup> por 2.54 cm de diámetro. Nos ayudamos con un esmeril de banco para quitar el excedente de la muestra y para tener una superficie un poco más uniforme. Posteriormente utilizando pegamento epóxico pegamos otro testigo de madera sobre la muestra para formar un espécimen “emparedado”, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 2.3. Especimen final

Finalmente envolvemos los cilindros con *maskin tape* y plástico para evitar que caiga material en los instrumentos.

## 2.2.3 Medición

Cuando ya tenemos preparados todos los especímenes que conforman nuestras muestras viene la etapa de la medición en laboratorio. Para esto se utiliza un magnetómetro de giro JR6 y un desmagnetizador de campos alternos.

### 2.2.3.1 Magnetómetro de Giro

El magnetómetro de giro es un instrumento que mide la NRM, que como vimos en la sección 1.3.1 es la suma de la magnetización adquirida al momento de la formación, las secundarias y la inducida.

El espécimen se coloca en un soporte especial para especímenes cilíndricos. La base del funcionamiento del magnetómetro de giro es que el soporte conteniendo al espécimen girará a una velocidad angular constante en la vecindad de un detector. El espécimen inducirá un voltaje AC en el detector, la amplitud y la fase del voltaje van a depender de la magnitud y la dirección del vector de la magnetización remanente (RM) del espécimen. La amplitud va a depender proporcionalmente a la proyección del vector RM al plano perpendicular al eje de rotación. La fase va a depender de la dirección de la proyección del vector RM en el plano perpendicular al eje de rotación. Para obtener la tercera componente RM se debe poner al espécimen a 90° .

---

<sup>7</sup> Esa es la altura máxima para que el espécimen entre bien en el magnetómetro pero algunas veces, cuando no se tiene demasiado material adherido al testigo, pueden tener menos altura. Mientras más material tengamos, podremos obtener mejores resultados.

A través del programa REMA6 se obtienen la declinación, inclinación e intensidad de la magnetización remanente del espécimen.



Figura 2.4. Magnetómetro de giro

Para conseguir una reducción en el error se deben de realizar mediciones variando las posiciones del espécimen en el magnetómetro. En esta tesis se colocaron los especímenes para su medición en 4 posiciones diferentes como lo muestran las siguientes figuras:

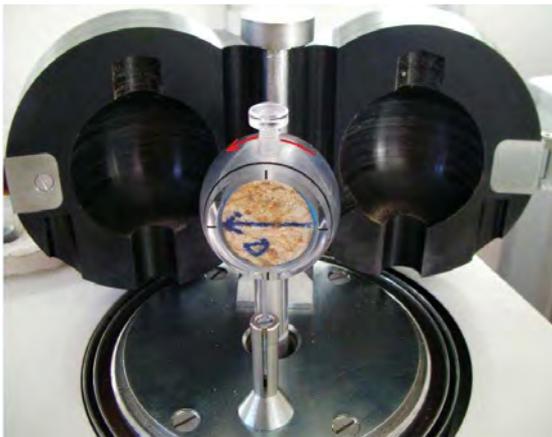


Figura 2.5. Posición 1 en el magnetómetro



Figura 2.6. Posición 2 en el magnetómetro



Figura 2.7. Posición 3 en el magnetómetro



Figura 2.8. Posición 4 en el magnetómetro

### 2.2.3.2 Desmagnetizador de campos alternos

Una vez que se midió con el magnetómetro la NRM de todos los especímenes de la muestra se eligen determinados especímenes pilotos en base a su intensidad medida y a su dirección en la red estereográfica para ser desmagnetizados con un desmagnetizador de campos alternos.

El desmagnetizador de campos alternos es un instrumento que nos sirve para eliminar magnetizaciones secundarias. Se aplica un campo sinusoidal al espécimen causando que las partículas de menor o igual coercitividad  $H_c$ ; cuándo se disminuye el campo dichas partículas sufren un desordenamiento por lo que sólo las partículas con mayor coercitividad que el campo aplicado permanecen alineadas.

Se va aumentando a intervalos determinados la intensidad del campo magnético aplicado, después de cada aumento se mide de nuevo su dirección e intensidad en el magnetómetro. El campo aplicado en un desmagnetizador de campos alternos puede variar desde 25 a 1000 Oe.



Figura 2.9 Desmagnetizador de campos alternos

Como se utiliza un desmagnetizador con motor que hace girar el espécimen, sólo es necesario colocarlo en dos posiciones perpendiculares como se muestra en las siguientes figuras:



Figura 2.10. Posición 1 en el desmagnetizador (vista desde arriba)

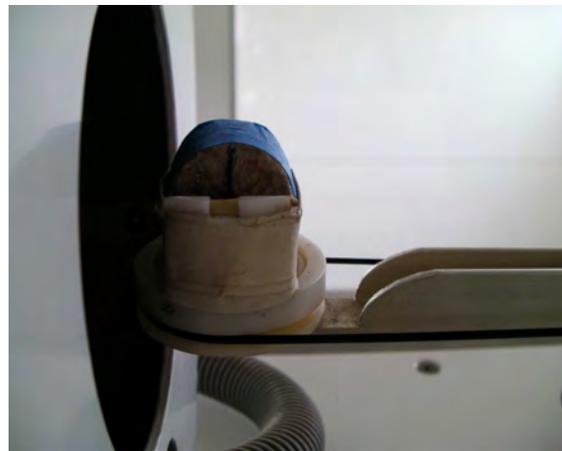


Figura 2.11 Posición 2 en el desmagnetizador (vista lateral)

## 2.2.4 Procesamiento

### 2.2.4.1 Diagrama de Zijdeveld

Los datos de cómo varía la declinación, la inclinación y la intensidad del espécimen al ir aumentando el campo con el desmagnetizador se pueden procesar mediante un diagrama de Zijdeveld que combina la intensidad y los cambios de dirección.

El punto final del vector de magnetización se proyecta como dos puntos en dos planos ortogonales; el plano horizontal conteniendo al vector  $\sqrt{x^2 + y^2}$  y el plano vertical que puede contener al vector  $x\sqrt{x^2 + y^2}$  o al  $y\sqrt{y^2 + z^2}$ . Donde:

$$\begin{aligned}x &= M \cos I \cos D \\y &= M \cos I \sin D \\z &= M \sin I\end{aligned}\quad 2.1$$

Con M que es la intensidad, I que es la inclinación y D que es la declinación. Usualmente se toma x como la coordenada norte, -x la sur, y la este y -y la oeste.

La figura 2.4 ejemplifica cómo se va construyendo el diagrama de Zijdeveld. La distancia que los puntos que forman el diagrama con respecto al origen son proporcionales a la intensidad.

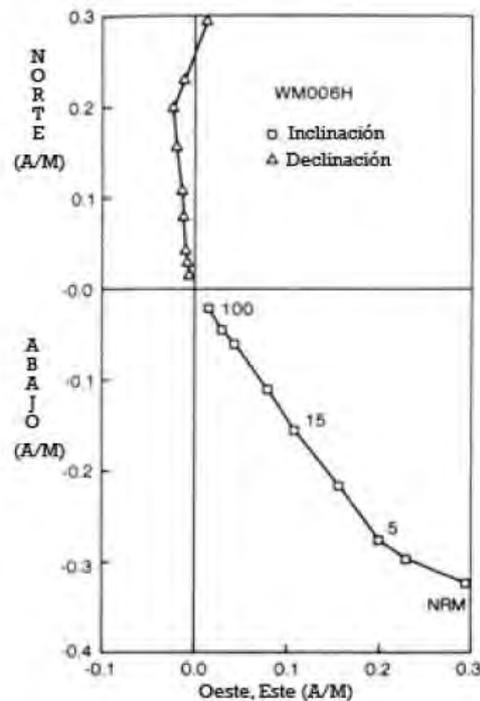


Figura 2.6. Construcción de un diagrama de Zijdeveld (Modificado de Eighmy, 1990)

### 2.2.4.2 Estadística de Fisher

La estadística de Fisher nos es útil al describir la dispersión de direcciones paleomagnéticas alrededor de una dirección promedio<sup>8</sup>. La probabilidad de encontrar una dirección particular en un ancho de banda entre  $\theta$  y  $\theta + d\theta$  es

$$P_f(\theta|\kappa) = \int_{\theta}^{\theta+d\theta} p_f(\theta'|\kappa) d\theta' \quad (2.2)$$

$\theta$  es el ángulo entre la dirección promedio y el dato y  $\kappa$  es el llamado parámetro de precisión, que mide la dispersión direccional del dato alrededor de la dirección promedio.

La función de densidad de probabilidad correspondiente es

$$p_f(\theta|\kappa) = \frac{\kappa}{2\text{senh}\kappa} \text{sen}\theta \exp(\kappa \cos \theta) \quad (2.3)$$

Si se considera la dispersión de direcciones en la superficie de una esfera unitaria, la probabilidad de que un dato en particular caiga en un área diferencial de  $dA = \text{sen}\theta d\theta d\phi$  es

$$P_f(A|\kappa) = \int_{\phi}^{\phi+d\phi} \int_{\theta}^{\theta+d\theta} p_f(A'|\kappa) \text{sen}\theta' d\theta' d\phi' \quad (2.4)$$

$\phi$  es el ángulo azimutal simétricamente distribuido alrededor de  $\hat{x}_{\mu}$ .

La función de densidad de probabilidad correspondiente es

$$p_f(A|\kappa) = \frac{\kappa}{4\pi \text{senh}\kappa} \exp(\kappa \cos \theta) \quad (2.5)$$

La normalización de la función de densidad de probabilidad de Fisher es

$$\int_0^{\pi} p_f(\theta'|\kappa) d\theta' = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} p_f(A'|\kappa) \text{sen}\theta' d\theta' d\phi' = 1 \quad (2.6)$$

Consideremos ahora un conjunto de datos paleomagnéticos, los cosenos directores de la  $i$ ésima dirección están dados por

$$\begin{aligned} x_{1i} &= \cos I_i \cos D_i \\ x_{2i} &= \cos I_i \text{sen} D_i \\ x_{3i} &= \text{sen} I_i \end{aligned} \quad (2.7)$$

La dirección media puede calcularse con las siguientes expresiones:

---

<sup>8</sup> Definida por un vector unitario  $\hat{x}_{\mu}$ .

$$D = \tan^{-1} \frac{\sum x_{2i}}{\sum x_{1i}} \quad (2.8)$$

$$I = \frac{\text{sen}^{-1} \sum x_{3i}}{R}$$

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

El parámetro de precisión que introdujimos en la ecuación 2.2 está dado aproximadamente por

$$\kappa = \frac{N-1}{N-R} \quad (2.9)$$

Donde N es el número de valores<sup>9</sup>. A medida de que  $R \rightarrow N$  el parámetro de precisión  $\kappa$  aumenta y la distribución de direcciones se vuelve más conglomerada alrededor de la dirección promedio.

Para la estadística de Fisher se puede tener un intervalo de confianza de que la dirección media verdadera se pueda encontrar en un margen (entre  $\theta$  y  $\theta + d\theta$ ) El intervalo de confianza más comunmente utilizado es el  $\alpha_{95}$  que significa un intervalo de confianza del 95%. El  $\alpha_{95}$  lo forma un ángulo de 95° alrededor de la media del vector director y es representado por un círculo de radio  $\alpha_{95}$  sobre la red estereográfica.

Aproximadamente está dado por la siguiente expresión

$$\alpha_{95} \approx \frac{140^\circ}{\sqrt{\kappa N}} \quad (2.10)$$

Un valor grande de  $\kappa$  y uno pequeño de  $\alpha_{95}$  significa una mejor precisión en los resultados.

La forma gráfica de observar la estadística de Fisher es através de una red estereográfica. En la red estereográfica las declinaciones corren de 0 a 360° en la periferia de una circunferencia y las inclinaciones de 0 a 90° en un par de ejes coordenados. La figura 2.5 muestra un ejemplo de una red estereográfica.

---

<sup>9</sup> En nuestro caso puede ser el número de especímenes de una muestra o el número de desmagnetizaciones de un especimen.

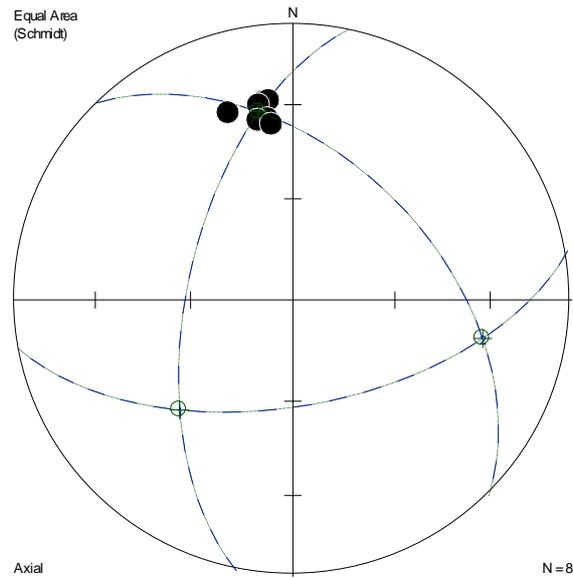


Figura 2.7. Red estereográfica. La media de la dirección de los vectores y la dirección individual de cada espécimen se grafican en la red.

## 2.5 Fechamiento

Cuando ya se tiene la dirección característica de cada muestra, obtenida de la media de sus especímenes, ésta se compara con la curva de variación secular del área donde se esté haciendo el estudio.

Se buscan puntos de coincidencia tanto en declinación como inclinación y dónde ocurra corresponderá a fechas arqueomagnéticas probables.

Éstas fechas probables se presentan al arqueólogo para escoger una o más que correspondan a lo esperado para la estratigrafía del sitio y de preferencia que ya hayan sido fechadas por otro tipo de métodos.

---

## CAPÍTULO 3. CONTEXTO ARQUEOLÓGICO

---

### 3.1 Introducción

Se toma como la teoría más aceptada para el poblamiento de América que el hombre procedente del norte de Asia cruzó por el Estrecho de Bering durante el Pleistoceno<sup>1</sup> tardío, aunque la discusión para determinar el tiempo de entrada más aproximado aún continúa. Fray Joseph d'Acosta fue uno de los primeros que sugirió hacia finales del siglo XVI, en su libro *Historia natural y moral de las Indias*, que el hombre americano debió haber llegado desde Europa o Asia suponiendo que en algún punto hacia el ártico ambas tierras debieran estar unidas o al menos muy cercanas entre sí (Acosta, 1962). Sin embargo, existen aún muchas preguntas por ser contestadas como por ejemplo si el ingreso a nuestro continente se llevó a cabo en una o más oleadas migratorias, si fueron más de una población original, en qué condiciones culturales se encontraban, qué camino siguieron para llegar hasta la punta sur, si el subsecuente desarrollo de las culturas fue de manera autóctona -el surgimiento de la agricultura y los asentamientos sedentarios se llevaron a cabo independientemente en el continente Americano- o siguiendo la teoría difusionista se tuvo un influencia muy marcada del Viejo Mundo.

Posiblemente la discusión en la que se ha centrado más atención sea la de la teoría Clovis-first contra pre-Clovis, en la cuál se trata de determinar el tiempo de llegada de los primeros pobladores y, aunado a esto, resolver si el hombre americano se puede correlacionar con el Paleolítico Superior o El Paleolítico Inferior-Medio del Viejo Mundo, respectivamente. José Luis Lorenzo observó que el término Paleolítico Inferior entraba en conflicto al buscar designar una periodización para el Nuevo Mundo, por lo que definió el llamado Arqueolítico, mientras que el equivalente para el Paleolítico Superior lo definió como Cenolítico (Lorenzo 1967 y 1975). El término Arqueolítico se refiere a las industrias locales relativamente simples y más generalizadas de tiempos tempranos, el Cenolítico caracteriza las industrias de piedra especializadas y sofisticadas con puntas de proyectil bifaciales.

La teoría Clovis-first (Lynch, 1990; Fiedel 1996) propone que los cazadores de puntas acanaladas de Norteamérica del llamado "Paleoindio"<sup>2</sup> siguieron por tierras altas a lo largo del continente hasta derivar en puntas "Cola de pescado" en Sudamérica<sup>3</sup>. Por otra parte los defensores de la teoría pre-clovis (Bryan y Gruhn, 1989 y 1992; Mac Neish, 1992; Dillehay 1984 y 2000) al haber estudiado sitios en Sudamérica que no se pueden asociar con el "Paleoindio" – al presentar una temporalidad anterior así como una diferencia clara

---

<sup>1</sup> El Pleistoceno es la época geológica previa a la que nos encontramos actualmente, el Holoceno. El Pleistoceno comprende desde 2.5 m.a hasta 10,000 a.p.

<sup>2</sup> El Paleoindio se define como una etapa del desarrollo económico, social y político en las culturas prehistóricas de América que se caracteriza por cazadores intensivos de fauna mayor y una organización social en bandas (Fiedel, 1996).

<sup>3</sup> Para el sitio Aubrey el límite cronológico de la cultura Clovis es de  $11570 \pm 70$  a.p. mientras que para el de Murray Springs es de  $10890 \pm 50$  a.p. (Taylor *et al.*, 1995).

en su tradición tecnológica – proponen que debió haber una cultura pre-Clovis<sup>4</sup> que siguió una ruta diferente para llegar hasta la punta sur del continente. Uno de los sitios en Sudamérica que representa un claro cuestionamiento a la visión Clovis-first es Monte Verde en la selva tropical de Chile, lo cuál motiva a estudiar más ampliamente las regiones tropicales del continente al abrir el debate para nuevas rutas de poblamiento de América así como una variabilidad cultural de los primeros pobladores.

## 3.2 Prehistoria de América

### 3.2.1 Modelos de poblamiento

El primer sitio donde se encontró evidencia de artefactos asociados a mamíferos de la era glacial en América fue en Folsom, Nuevo México. El descubrimiento lo realizó Jeese Figgins, quién previamente había encontrado dos puntas de proyectil en Lone Wolf Creek durante una excavación paleontológica entre restos óseos de un bisonte extinto asociado con la época pleistocénica. Sin embargo, el descubrimiento de Lone Wolf Creek no fue tomado en cuenta debido a que no contaba con la presencia de un experto que lo testificara. En el sitio Folsom, Figgins encontró nuevamente puntas acanaladas<sup>5</sup> en restos óseos de bisonte extinto y esta vez el hallazgo fue validado por un grupo amplio de arqueólogos. La implicación que tuvo dicho hallazgo fue muy grande al dar evidencia de que el hombre americano habría coexistido con fauna pleistocénica extinta, debate que desde mitad del siglo XIX ocupaba a investigadores como Lund, Ameghino y Hrdlicka (Bate y Terrazas, 2006).

Consecuentemente se fueron excavando más sitios en las Grandes Planicies de Estados Unidos y se confirmó así la presencia de puntas acanaladas en toda la región. Con las excavaciones subsecuentes a Folsom se comenzó a gestar entre la comunidad arqueológica una nueva periodización de la arqueología americana conocida como “Paleoindio” (Fiedel, 1996).

Sin embargo, esta visión de que la cultura Clovis, o complejo del “Llano”, fue la primera y que de ella derivaron poblaciones posteriores a lo largo del continente fue cuestionada al encontrarse sitios en Sudamérica<sup>6</sup> con una temporalidad anterior y con tecnología que no podía relacionarse claramente como subsecuente, siendo el más importante al lograr superar análisis exhaustivos que se le han impuesto, Monte Verde en Chile.

El sitio Monte Verde en Chile, con una temporalidad entre 12,300 y 12,800 años a.p.<sup>7</sup>, ha sido ampliamente estudiado y se considera el mejor aceptado para valorar una cultura anterior a la Clovis. Lo más destacado del sitio es que se encontró una tecnología sencilla a base de piedras de río y la industria lítica hallada ahí no se han podido asociar a las puntas acanaladas de Norteamérica al ser más simple. Es aceptado, por las evidencias que se tienen

---

<sup>4</sup> El término pre-Clovis es el que ha tenido más difusión entre los diversos grupos de investigadores, sin embargo hay que hacer notar que este resulta del todo apropiado en áreas geográficas donde no se ha mostrado que el complejo Clovis se haya manifestado.

<sup>5</sup> Este tipo de puntas al ser tan características fueron nombradas “puntas Folsom”

<sup>6</sup> La búsqueda metódica de sitios tempranos en Sudamérica se vio rezagada hasta 1950’s.

<sup>7</sup> Me refiero con esto a la etapa Monte Verde II (MV-II), mientras que la etapa Monte Verde I (MV-I) presuntamente tiene una datación de 33,000 ap aunque aún no hay evidencias científicas duras que la sustenten o rechacen.

hasta el momento de sitios tempranos, que al menos hace 11,000 años a.p. en Sudamérica ya había una gran diversidad cultural (Dillehay, 1987, 1997 y 2000).

Debido a la diversidad de ecosistemas que se pueden encontrar en el continente americano no se puede seguir un modelo de poblamiento lineal. Éste debe ser analizado desde diferentes aspectos para que pueda ser congruente con las observaciones que se han realizado y que quedan por hacerse. Las dos teorías más plausibles que tratan de explicar estas rutas de poblamiento son la “Oleada Migratoria” y “Ruta costera del pacífico”<sup>8</sup>.

El descubrimiento de grupos tempranos en Norteamérica apoyó la teoría de que la ruta seguida por los primeros en llegar al continente americano fue a través del hipotético “corredor libre de hielo”, franja de tierra expuesta entre los casquetes glaciares Lauréntido y el Cordillerano. El “corredor libre de hielo” emergió y se sumergió periódicamente durante la última glaciación Wisconsin (75,000 – 10,000 años a.p.) (Fiedel, 1996) y, acorde a los defensores de la perspectiva Clovis-first, fue durante el último período de emergencia que se llevó a cabo el cruce de los primeros en arriivar al continente americano<sup>9</sup>. La teoría “Oleada migratoria” (Dixon, 1999) supone que el origen de los primeros pobladores del continente se remontaba a los cazadores especializados, ya siendo modernos Homo Sapiens Sapiens, del Paleolítico Superior de Siberia<sup>10</sup>. Siguiendo las manadas de mamuts continuaron hasta las Grandes Planicies de Estados Unidos, donde desarrollaron la distintiva tecnología Clovis, especializada en la caza de herbívoros de gran tamaño (Bryan, 1999). Posteriormente continuaron expandiéndose hasta poblar por completo el continente Americano en menos de un milenio, esto es, con un poblamiento acelerado. Este modelo, como veremos más adelante, presenta fallas al no tomar en cuenta la variedad de ecosistemas a lo largo del continente.

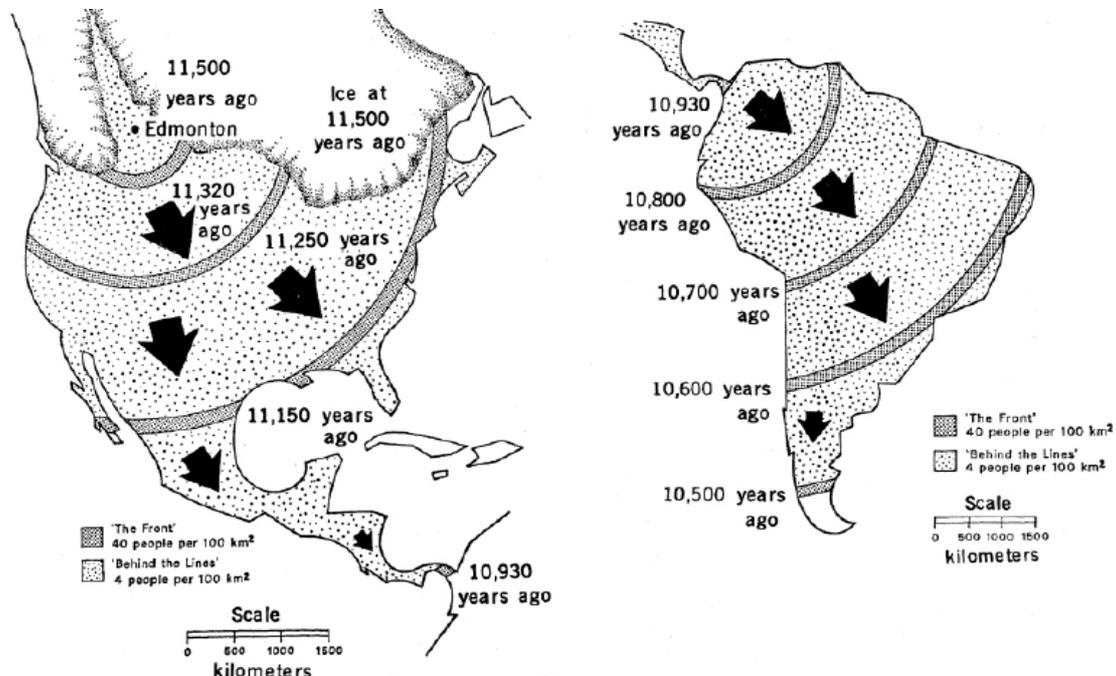


Figura 3.1 Modelo de poblamiento “Oleada Migratoria” (Martin, 1967)

<sup>8</sup> Siendo el modelo de “Oleada Migratoria” correspondiente a la perspectiva Clovis-first y el de “Ruta costera del pacífico” propuesto por los seguidores de la teoría pre-Clovis.

<sup>9</sup> Aproximadamente entre 15,000 y 13,000 a.p. (Bryan y Gruhn, 1989 y 1992).

<sup>10</sup> Con un origen más antiguo en Europa.

El modelo de “Ruta costera del pacífico”, propuesto inicialmente por Fladmark, también parte del hecho que los primeros pobladores cruzaron al continente Americano por el estrecho de Bering, pero plantea que siguieron por las costas del Pacífico Noroeste que se encontraban libres de hielo. Dixon (1999) posteriormente propuso que los pobladores tempranos siguieron la franja costera hasta Sudamérica, donde tanto el ambiente como la altitud no difieren en gran medida a lo largo del continente. Una vez colonizado la costa del pacífico, el hombre americano se pudo haber venturado al interior del continente siguiendo los márgenes de los ríos. Lo anterior explicaría el hecho de que se hayan encontrado sitios como Monte Verde con una temporalidad anterior a la Clovis.

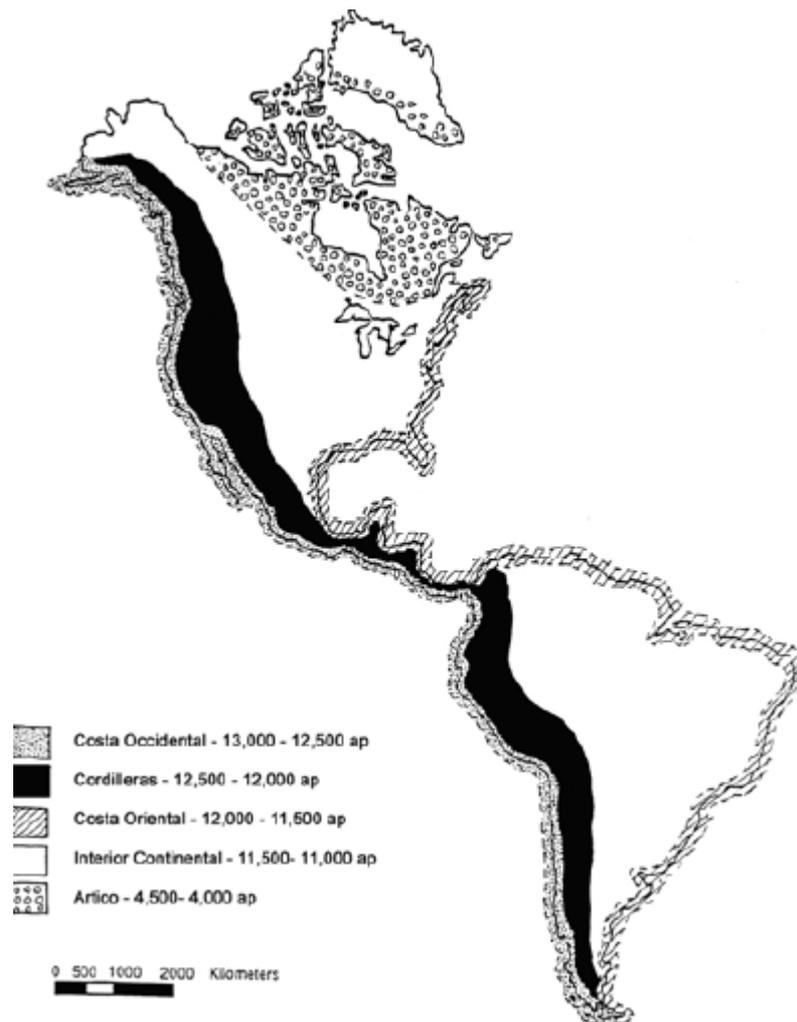


Figura 3.2 Modelo de poblamiento “Ruta costera del pacífico” (Acosta, 2008)

Las evidencias morfológicas, genéticas y tecnológicas apuntan a un origen asiático de los primeros pobladores del continente americano y tratando de compararlas con los descubrimiento de sitios tempranos a lo largo del continente, se ha podido llegar a una serie de suposiciones que trata de explicar el estado cultural de las poblaciones tempranas. Algunos ejemplos de estas son las mencionadas a continuación:

1. *Evolución:* Un tardío transicional Homo Sapiens del este asiático entró a América y fue aquí donde evolucionó a un moderno Homo Sapiens Sapiens (Bryan, 1999). Trajeron consigo una tecnología sencilla de lascas unifaciales que tendrían el potencial de evolucionar en puntas de proyectil bifaciales (Bryan y Gruhn, 1989).
2. *Diversidad en tecnología.* El hombre temprano adaptó su tecnología para cazar dependiendo de los ambientes a los que estuvo expuesto. En las Grandes Planicies su tecnología evolucionó a una de Paleolítico Superior, al implementar puntas acanaladas bifaciales y otras herramientas especializadas en la caza de herbívoros de gran tamaño con un comportamiento predecible. En cambio, en los bosques y áreas tropicales no se llegó a una evolución de tecnología hasta ese estadio debido a que simplemente no era necesario, resultaba más eficiente la implementación de trampas y otro tipo de puntas de proyectil para cazar animales de menor tamaño. Sin embargo, es posible que aquellas sociedades cazadoras recolectoras pudiesen desarrollar puntas acanaladas bifaciales al irse adaptando a ecosistemas en el interior del continente donde se encontraban las manadas de grandes herbívoros (Bryan, 1999). Con lo anterior se podría pensar la posibilidad de procesos convergentes de desarrollo y explicar así que sitios en Sudamérica donde se encontraron puntas “cola de pescado” sean contemporáneos o anteriores incluso a sitios Clovis de Norteamérica.
3. *Tiempo de poblamiento.* El tiempo que le tomó al hombre temprano para llegar hasta la punta sur del continente propuesto por los defensores de la teoría Clovis-first es de menos de un milenio (Martin, 1967), lo cuál parece ser erróneo desde el modelo de colonización de los distintos subambientes continentales propuesto por James Dixon. Para Dixon el proceso de colonización, especialmente cuándo se tiene un gradiente muy marcado de ambientes; es complicado y prolongado ya que contiene varias etapas como son la *exploración* del nuevo territorio sin aún habitarlo, la *fisión* de la población, la *migración y colonización* y finalmente el *asentamiento*, que es la etapa con un aprovechamiento efectivo de los recursos del nuevo territorio (Dixon, 1999).

Si bien el debate Clovis-first vs pre-Clovis ha sido el más socorrido en los últimos años, las implicaciones que estas dos teorías tienen resultan aún más interesantes, como se ha buscado esbozar en esta breve síntesis. El poblamiento de América no es un asunto que siquiera se está cercano a vislumbrar por completo por lo cuál los arqueólogos tienen una ardua labor por realizar.

### 3.2.2 Región tropical del sureste mexicano

La región norte de México ha sido más estudiada por diferentes motivos, como son la topografía del terreno y la amplia temporada de secas, segregando así investigaciones en el sureste Mexicano que pueden aportar gran evidencia para reconstruir el poblamiento temprano de nuestro continente. Las investigaciones que se han hecho en la región tropical del sureste Mexicano han señalado una relación en artefactos con las poblaciones asociadas a puntas “Clovis” de Norteamérica o con las poblaciones asociadas a “puntas cola de pescado” de Sudamérica (García-Bárcena 1980).

El proyecto Cazadores del Trópico Americano (PCTA) tiene como objetivo caracterizar una o más poblaciones que precedan o sean contemporáneas a las poblaciones asociadas a puntas acanaladas (puntas Clovis y “cola de pescado”) de Norte-, Centro- y Sudamérica. Más específicamente, el PCTA trata de determinar si existen poblaciones en el área centro occidental de Chiapas que puedan relacionarse con cazadores de industria expeditiva de Sudamérica, lo que Lus Felipe Bate definió como “modo de vida de los cazadores del Trópico Americano”.

### 3.2.2.1 Cazadores asociados con puntas acanaladas

Como ya se mencionó en la sección anterior, la población “Clovis” de Norteamérica es para los seguidores de la teoría Clovis-es-lo-más-antiguo la primera que apareció en el continente Americano y que recorrería por las tierras altas hasta derivar en puntas “cola de pescado” en Sudamérica.

En su supuesto paso hacia Sudamérica, debería observarse un tipo de tecnología asociada con este complejo cultural en el territorio mexicano. Esto ha sido corroborado con excavaciones donde se han encontrado puntas acanaladas, aunque estas tengan más similitud con otras acanaladas de Centroamérica (Santamaría y García Bárcena, 1989).

Se han podido distinguir al menos 3 grupos de puntas:

1. Puntas Clovis “típicas”: Su característica principal son sus lados paralelos, hacia Centroamérica parecen reducir en dimensión
2. Puntas Clovis “de lados cóncavos”:
3. Puntas “Cola de pescado”

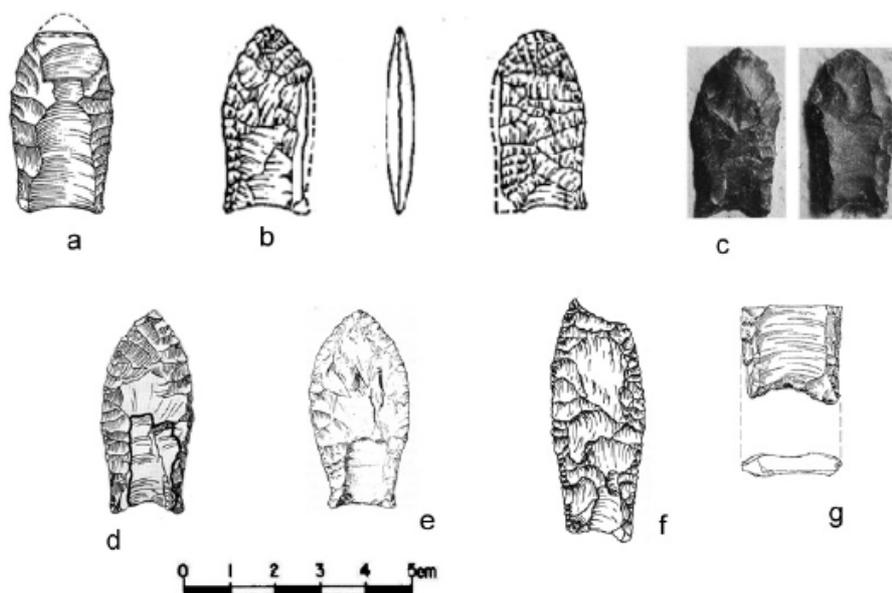


Figura 3.3 Puntas Clovis (a) Oaxaca (b) Los Grifos (c-d) Altiplano de Guatemala, (e) Lago Madden en Panamá, (f) Ladyville en Belice, (g) El Inga (Ecuador) . (Acosta, 2008)

Por el resto de los materiales asociados a las puntas acanaladas, como raspadores parabólicos y láminas con dorso rebajado, se sugiere que una subsistencia de estos grupos altamente dependiente de la caza.

En el sureste mexicano el sitio que se puede asociar más claramente a los cazadores de puntas acanaladas es Los Grifos, al encontrarse una punta Clovis “de lados cóncavos” y fragmentos de puntas “cola de pescado” con temporalidad asociada al sitio de  $8930 \pm 150$  y  $9300$  años a.p.<sup>11</sup> (Santamaría y García-Bárcena, 1989; Acosta, 2008). Sitios de “puntas acanaladas” han aparecido en Centroamérica, pero Los Grifos y Los Tapiales en Guatemala parecen ser los únicos con fechas de radiocarbono asociadas (Acosta, 2009). Por su disminución de dimensiones así como presentar ligeras concavidades laterales, las puntas encontradas en Los Grifos parecen compartir características más claramente con sitios en Belice, Guatemala, Honduras y Costa Rica. Por lo anterior, además de la geografía del continente, no nos resulta extraño que se consideren a las puntas de Los Grifos como un etapa transicional entre las puntas Clovis “típicas” de Norteamérica y las “Cola de Pescado” de Sudamérica. Por su forma de manufacturación y forma se podría decir que los materiales asociados a puntas acanaladas de Los Grifos se asemejan más a las puntas “cola de pescado” de Sudamérica que a las “Clovis” de Norteamérica (Acosta, 2007).

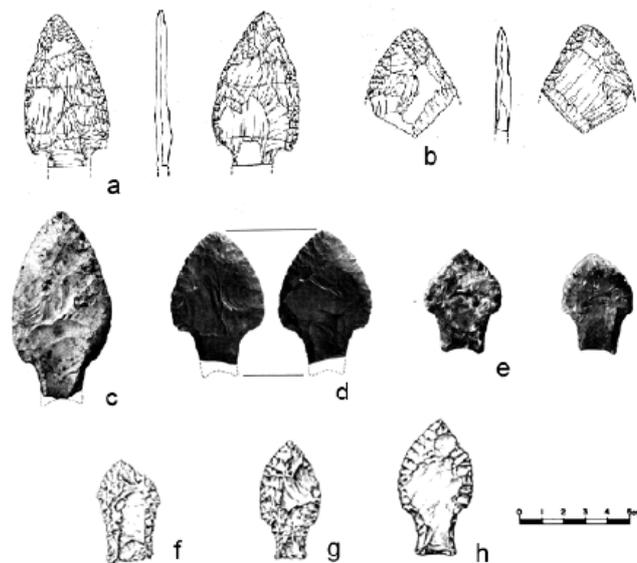


Figura 3.4. Puntas “Cola de pescado”. (a-b) Los Grifos, (c-e) Lago Madden en Panamá, (f) El Inga en Ecuador, (g-h) Cueva Fell en Chile. (Acosta, 2008)

<sup>11</sup> Siendo  $8,930 \pm 150$  a.p el fechamiento con Carbono 14 de las unidades de excavación 14 y 15 y el de  $9,300$  a.p. con la técnica de hidratación de obsidiana de la unidad de excavación 18.

### 3.2.2.2 Cazadores Recolectores del Trópico Americano

Luis Felipe Bate (Bate, 1990) caracterizó como “Cazadores recolectores del trópico Americano”<sup>12</sup> a un grupo particular en Sudamérica que habría desarrollado una tecnología de tipo “expeditiva”, esto es una tecnología poco especializada. Lo anterior podría llevar a pensar a dichos grupos culturales como “simples”, sin embargo el modo más correcto de entender su desarrollo sería como una forma de aprovechamiento notablemente diferente de su entorno pero no por eso menos eficiente. Prueba de esto es que esta tecnología se ha mantenido hasta nuestros días.

Algunas de las observaciones que Bate realizó en torno al modo de vida de los “cazadores recolectores del trópico Americano” (Bate, 1990) son:

1. *Instrumentos de piedra poco especializados*: Los cuáles habrían sido poco modificados a partir de lascas
2. *Aprovechamiento de los recursos a su alcance*: Estos grupos aprovechaban de manera efectiva los recursos de los lugares donde llegaban y de esta forma evitaban estarse desplazando para conseguir materia prima. El hecho de que variasen sus materiales dependiendo del lugar donde se estableciesen puede explicar la poca especialización de sus instrumentos. Algunos de los materiales que utilizaban eran hueso, concha y madera.
3. *Variedad de Instrumentos y técnicas*: Estos grupos usaron escasamente la talla bifacial, otras técnicas muy utilizadas por ellos son el piqueteado, el martillado y el desgaste para crear morteros y hachas principalmente y procesar así materiales orgánicos como semillas y hojas.

El sitio que asemeja más a las características definidas para los cazadores recolectores del trópico Americano en el sureste mexicano es la cueva de Santa Marta. La Fase I de ocupación (9200-9400 a.p.) de Santa Marta se caracterizó por tecnología expeditiva, con puntas de proyectil pequeñas, toscas y unifaciales. También se encontraron, en una fase con fechamiento alrededor de 9,000 a.p., piedras de molienda (Santamaría y García-Bárcena, 1982). El sitio de Santa Marta posee la mejor secuencia cronométrica para México, abarcando desde el doceavo milenio antes del presente, en fechas calibradas, hasta el siglo XIX (Acosta, 2009).

---

<sup>12</sup> Por la región geográfica donde han sido identificados, esto es desde la sabana Colombiana, hasta la costa Ecuatoriana y la región septentrional Andina (Acosta, 2004).



Figura 3.4. Cueva de Santa Marta.



Figura 3.5. Pintura Rupestre en la cueva de Santa Marta.

### 3.3 El sitio; Los Grifos, Ocozocoautla, Chiapas

#### 3.3.1 Entorno Geográfico

La región noroccidental de la Depresión Central de Chiapas (900 msnm) abarca parte de los municipios de Ocozocoautla, Cintalapa y Jiquipilas. Como parte de la Depresión Central de Chiapas se encuentra la meseta de Ocuilapa, cuyas paredes forman abrigos que han servido de resguardo para diferentes grupos culturales en diversas épocas. Ejemplos de dichos abrigos son los de Los Grifos y Santa Marta, los cuáles se abren en dirección sureste y por tanto son protegidos de la erosión ocasionada por lluvias y vientos procedentes del Golfo de México (Acosta, 2008). Los Grifos y Santa Marta se consideran “Cuevas Secas” donde la sedimentación es buena y por tanto las probabilidad que restos se conservasen en condiciones favorables aumenta, de esto que se hayan considerado sitios óptimos para excavar.



Figura 3.6. Abrigo Rocoso de Los Grifos

La petrografía del valle de Ocozocoautla es compleja, compuesta principalmente por rocas calizas de origen marino, areniscas, lutitas, arenas y macizo granítico cristalino. Los acantilados que dan origen al Abrigo Rocoso de Los Grifos y Santa Marta están compuestos por arenisca conglomerática de origen continental con abundantes carbonatos, producto de la consolidación de sedimentos detríticos (Santamaría y García-Bárcena, 1982). Al sur de la meseta de Ocuilapa, a menos de 2 km de Los Grifos, se encuentran bancos de pedernal que pudieron haber sido explotados desde los pobladores tempranos hasta la época prehispánica.

La región en cuestión posee un clima cálido subhúmedo, su índice de precipitación media anual es de 800 a 900 mm, menor que en el resto del estado pero aún así óptima para prácticas agrícolas y ganaderas que de cierta forma han modificado su vegetación, ahora de tipo matorral y bosque mediano subcaducifolio predominantemente.

La cueva de Los Grifos se formó por el ensanchamiento de una falla con un movimiento descendente del bloque occidental de unos 60 cm. El Abrigo Rocoso de los Grifos tiene una boca de 24 m. por 8 m. de profundidad aproximadamente (Santamaría y García-Bárcena, 1982).

### 3.3.2 Precedentes de Excavaciones

Mathew Stirling fue el primero en interesarse en la relación entre la cultura Olmeca del Golfo de México y la Maya en Chiapas. Realizó expediciones en el sureste mexicano entre las cuáles incluyó exploraciones a la región de Ocozocoautla, Chiapas. En 1945 realizó trabajos de exploración de Piedra Parada, cercana a la población actual de Ocozocoautla, donde definió la ocupación principal de sitio para el Preclásico, continuando durante el Clásico medio y el Posclásico (Acosta, 2009).

A partir de 1958, Fredrick Peterson realizó estudios para localizar ocupaciones del Preclásico en la región de Ocozocoautla. Los estudios que realizó Peterson fueron por parte de la Fundación Arqueológica Nuevo Mundo (NAAF), observando que en cuevas y abrigos rocosos se podían localizar algunos asentamientos cerámicos más tempranos. Encontró durante sus exploraciones más de 70 cuevas y abrigos, incluida entre ellos Santa Marta. Retomando las exploraciones de Peterson, Richard S. MacNeish en 1959 realizó sondeos en la cueva de Santa Marta. Los trabajos de Peterson y MacNeish mostraron evidencia para considerar una ocupación en la cueva de Santa Marta entre  $8730 \pm 400$  a.p. y el Posclásico (Acosta, 2009).

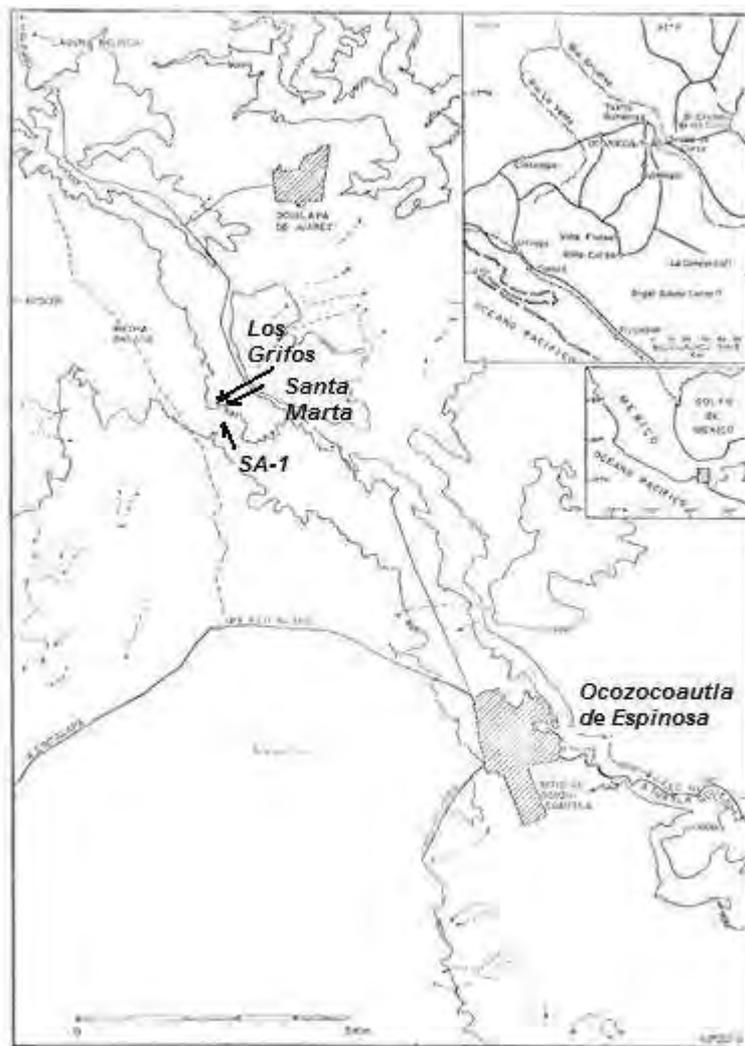


Figura 3.7 Localización de Los Grifos, Santa Marta, SA-1 (Modificado de Santamaría y García-Bárcena, 1982)

En los 70's, el extinto Departamento de Prehistoria del INAH, dirigido sucesivamente por la Arqueóloga Lorena Mirambell y el Profesor José Luis Lorenzo, realizó excavaciones en las cuevas de Santa Marta y Los Grifos, además de un sitio abierto llamado SA-1 (ver Figura 3.7) . El objetivo de estas excavaciones era investigar las características tecnológicas y económicas de las poblaciones precerámicas establecidas en la región (Santamaría y García-Bárcena, 1982).

El sitio SA-1, encontrado a unos 500 metros al sur de los abrigos de Santa Marta y Los Grifos, es un área de forma triangular. En su superficie se encontró material lítico de pedernal lo cuál podía sugerir una ocupación temprana. La exploración en este sitio se llevó a cabo mediante pozos, pero no se obtuvo información determinante. No fue posible asociar los artefactos encontrados, como navajas de obsidiana y lítica hecha de pedernal, ni espacial ni temporalmente. Por otro lado, los estudios en las cuevas de Santa Marta y Los Grifos resultaron más fructuosas.

Entre 1974 y 1976 en la cueva de Santa Marta fue se excavó un área de 58 m<sup>2</sup> con tres unidades de excavación “(Pozo A-11, Cala A/B y Cala HH/KK), identificando así 21 estratos con 11 ocupaciones importantes desde el 9,330±290 años a.p hasta el período colonial (Acosta, 2007).

Entre 1976 y 1977 en el abrigo rocoso de Los Grifos se excavó un área de 22 m<sup>2</sup>. Se pudieron identificar dos ocupaciones distintas, la más tardía fechada para el Clásico Medio y el Posclásico y la más temprana que aparece en 10 unidades estratigráficas (14 a 23) con fechas de radiocarbono entre 8930±150 y 9540±150 años a.p. Con lo que respecta a la ocupación más tardía fue encontrada lítica tallada en pedernal así como artefactos hechos en obsidiana, instrumentos de molienda en arenisca y caliza, y cerámica. Para la época más temprana en Los Grifos se pudo recuperar una punta acanalada del grupo Clovis y dos puntas de proyectil “cola de pescado”, asociadas con Sudamérica. Ambos tipos de puntas se encuentran asociadas aproximadamente a 9,000 años a.p., lo cuál podría sugerir un origen distinto de ambas tradiciones tecnológicas pero que en el sureste de México se habrían encontrado (Santamaría y García-Bárcena, 1982; Santamaría y García-Bárcena 1989).



Figura 3.8. Puntas cola de pescado (izq.) y Clovis (der.) de Los Grifos. (Acosta, 2009)

En la Figura 3.9 se muestran 5 sitios<sup>13</sup> de Norte- Centro- y Sudamérica donde se han encontrado puntas acanaladas y sus fechamientos calibrados.

<sup>13</sup> La Cueva de los Vampiros, Panamá, Piedra del Coyote, Los Tapiales en Guatemala, El Inga en Ecuador, Los Grifos en México

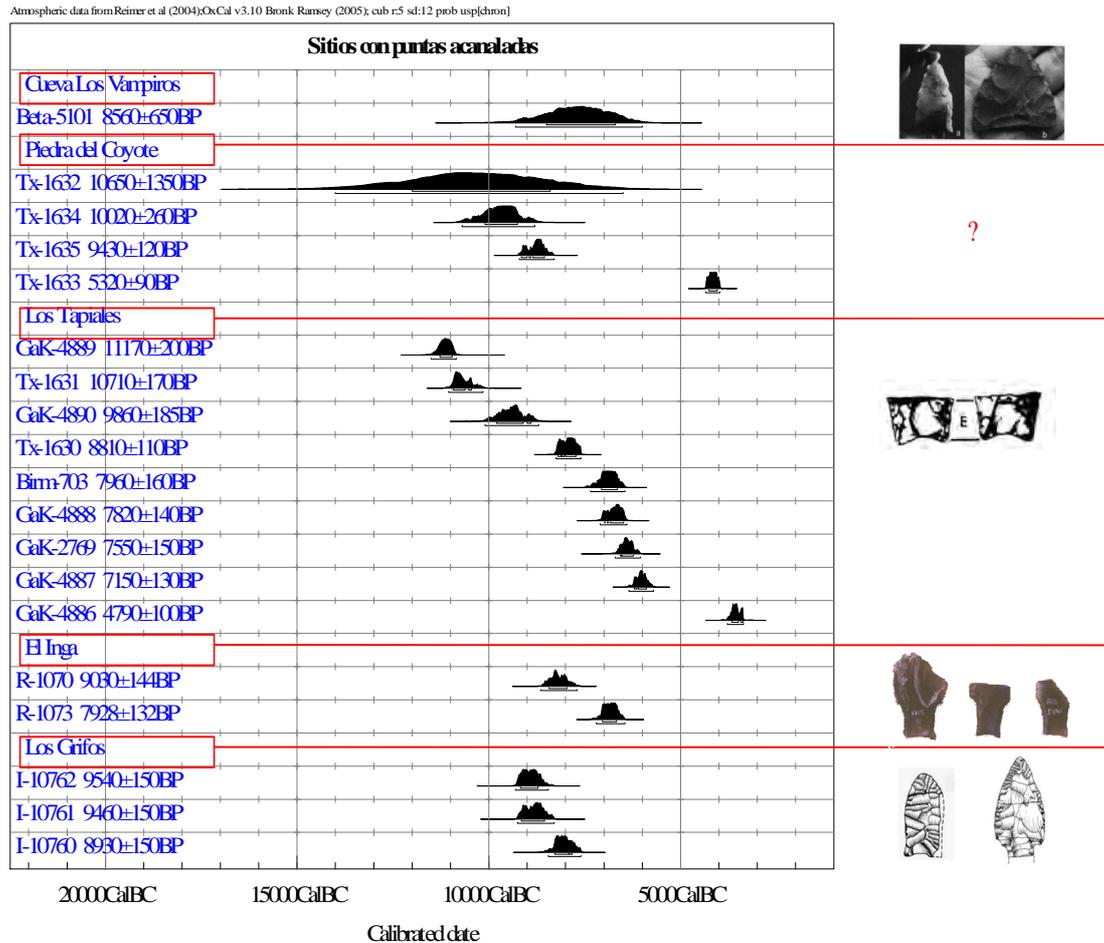


Figura 3.9. Fechas calibradas asociadas a puntas acanaladas entre el sureste de México y Ecuador. Datos de Pearson y Cooke 2002; Gruhn, Bryan y Nance 1977; Mayer-Oakes 1986; Santamaría 1981 (Acosta, 2009).

Piedra del Coyote y Los Tapiales reportan dos fechamientos de materiales anteriores a 10,000 años a.p. pero no se tiene certeza de su procedencia estratigráfica. Sin embargo, todos estos sitios con presencia de puntas acanaladas muestran una temporalidad entre 10,000 – 5,500 años a.p., ya a inicios del Holoceno.

### 3.3.3 Excavaciones en Los Grifos en el marco del Proyecto Cazadores del Trópico Americano

El Abrigo Rocosó de Los Grifos, con coordenadas UTM E0454736, N1859084, se encuentra localizado en el rancho “Las Margaritas” propiedad del señor Freddy Ruiz, en el municipio de Ocozacoautla de Espinosa, Chiapas. Los Grifos fue reubicado durante el proyecto de recorrido del Instituto de Investigaciones Antropológicas, dirigido por el Dr. Guillermo Acosta en 2005. Al encontrarse en buen estado, salvo por los sedimentos superficiales removidos debido las actividades ganaderas, se optó por incluirlo en un proyecto de excavación extensiva como una vertiente del Proyecto Cazadores del Trópico Americano llamado “Los grupos Clovis y el poblamiento inicial del sureste de México”. Las excavaciones en Los Grifos se llevaron a cabo durante tres temporadas de campo; 16 de Octubre al 10 de Diciembre de 2007, del 16 de Octubre al 10 de Diciembre de 2008 y del 9 de Marzo al 13 de Abril de 2009.

Tomando en cuenta los trabajos del Departamento de Prehistoria del INAH en los setentas, en la temporada de 2008 lo primero que se hizo fue establecer un punto de origen (*datum*) y tratar de localizar el área de excavación anterior con el objetivo de correlacionar los datos.



Figura 3.10 Colocación de la retícula. (Acosta, 2009)

Posteriormente se delimitó el área de excavación, la cuál tuvo una superficie de 40m<sup>2</sup> y a diferencia del área de excavación previa se orientó con el norte magnético. La retícula consistió de cuadros de 1m<sup>2</sup>, a partir del *datum*, 8 metros en dirección este y 5 metros en dirección norte. La forma de nombrar cada cuadrante fue mediante números cardinales en su dirección norte y este, por lo cuál la retícula corrió de N1 a N5 y de E1 a E8<sup>14</sup>. A los cuadros E7 y E8, entre el N2 el N5 se les denominó “Unidad de Excavación 2” ya que se traslapaban en parte con la excavación previa. Durante la temporada de 2009 el área de excavación se amplió a los cuadros N6 a N7 y E5 a E8, nombrándolos “Unidad de Excavación 3”.

---

<sup>14</sup> El cuadro N1E1 no fue excavado para poder colocar la estación total.

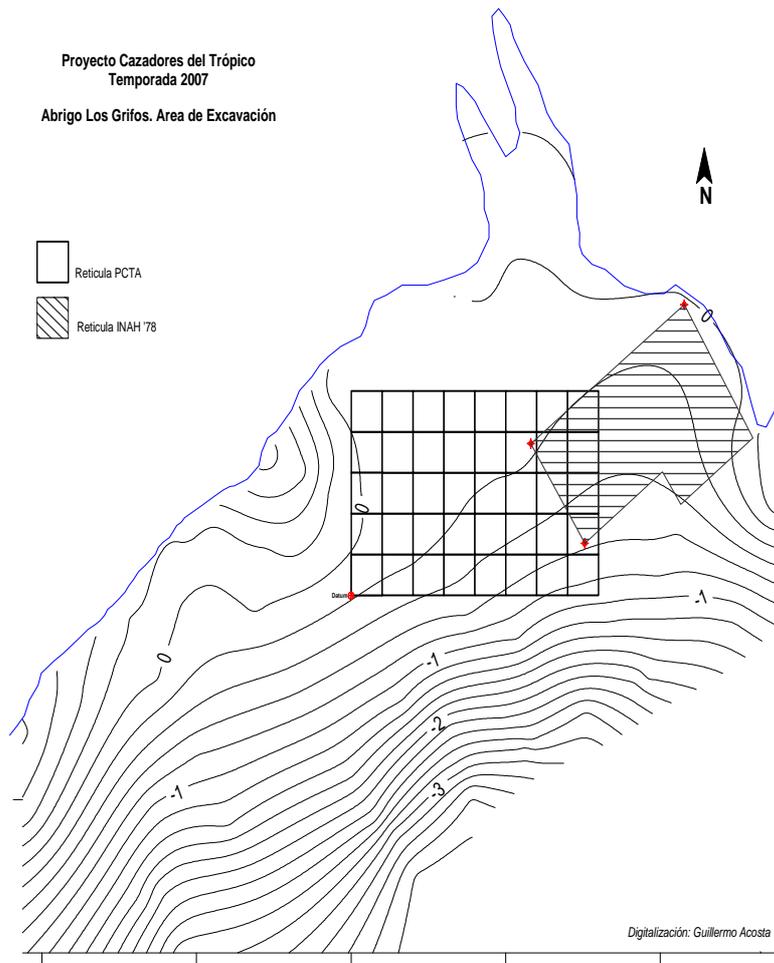


Figura 3.11 Topografía y retículas (PCTA 2007 e INAH 1978) (Acosta, 2009)



Figura 3.12. Excavación en Los Grifos.

La excavación en sitios precerámicos conlleva una dificultad adicional al tener que lidiar con la estratigrafía compleja que presentan. El método de excavación que se siguió fue inspirado en los trabajos de Richard S. MacNeish y Kent Flannery, que consisten en hacerlo de manera escalonada con el objetivo de preservar la estratigrafía del terreno. En este caso se comenzó por excavar la unidad 2 con el fin de exponer los límites de excavación de los trabajos anteriores. Sin embargo, no fue posible divisar de manera clara las más de 30 unidades estratigráficas descritas por Santamaría y García-Bárcena a partir de las nuevas excavaciones por lo que una correlación exacta no ha sido posible hasta el momento (Acosta, 2009). Se tomaron muestras sedimentarias para análisis químicos y microfósiles con el fin de correlacionar las 3 unidades de excavación, en particular la unidad de excavación 2.

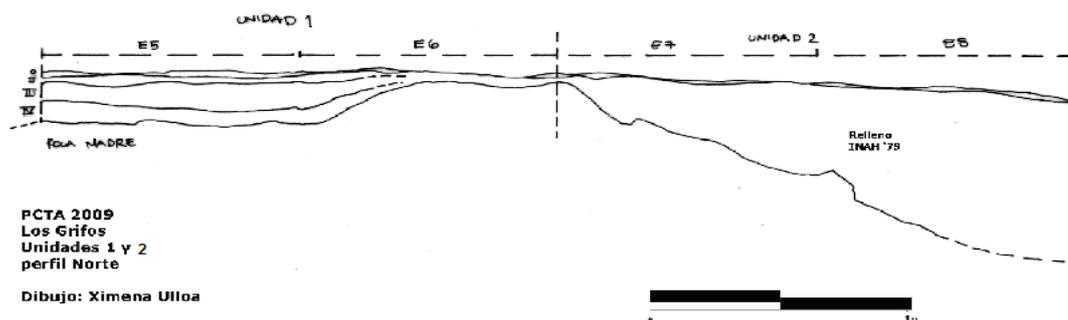


Figura 3.13. Perfil norte, Unidades 1 y 2.

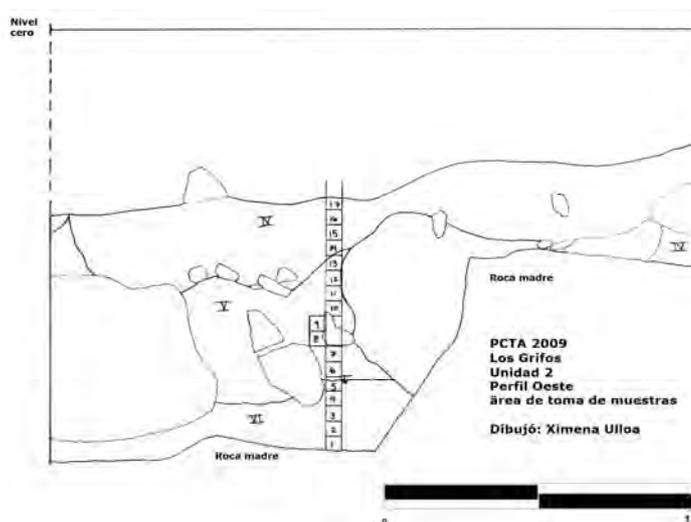


Figura 3.14. Perfil Oeste Unidad 2.

Entre el material arqueológico recuperado se encontró lítica, cerámica, hueso, ceniza, material botánico (madera, semillas, coprolitos) y concha. El registro de los materiales encontrados se hizo tomando los datos de cuadro, capa y nivel, así como sus coordenadas X, Y y Z (por medio de una estación total situada en N1E1) para tener un registro tridimensional del elemento<sup>15</sup>. Lo anterior sirvió para la elaboración de fotoplanos los cuales resultan útiles para observar la distribución de artefactos y poder realizar inferencias

<sup>15</sup> A cada material se le designó un número de catálogo único.

de áreas de actividad (Acosta, 2009). Además se tomaron muestras de sedimento para flotación y análisis químicos.

A continuación se presenta una tabla que resume los materiales encontrados en la Unidad de excavación 1:

CAPA	NIVEL	MATERIAL ORGÁNICO	MATERIAL ARQUEOLÓGICO	OBSERVACIONES
0		Pasto, hojarasca. Huesos de roedores y reptiles. Semillas carbonizadas y sin carbonizar	Principalmente lítica y escasa cerámica. Vidrio y materiales modernos	Capa Superficial. Bioperturbación por la actividad ganadera en el lugar. Sustrato limo-arenoso.
II	1	Semillas, madera, raíces y hojarasca	5 raederas y 1 raspador de pedernal. Lascas y láminas sin retoque.	Consistencia más arenosa que la capa 0. Concentración de carbón y ceniza hacia el Noreste de la retícula.
III	1	Semillas, madera y raíces	Pedernal, lutita y escasa cerámica	Composición arenosa hacia el oeste y limo-arcillosa hacia el sureste
	2 y 3	Semillas y madera. Huesos pequeños	Pedernal, cuarcita y cerámica	Aumenta material arenoso
	4 y 5	Semillas y madera.	Lascas y láminas de pedernal . Un raspador de pedernal. Lascas de cuarcita.	Se observan cantos rodados. Composición más arenosa y de coloración clara.
IV	1	Semillas, madera y hueso.	Predominantemente lítica	Sedimento limo-arenoso y gravilla
	2	Concentración mayor de hueso	Concentración mayor de lítica	Ceniza endurecida
	3, 4, 5 y 6	Semillas, madera y hueso	Lítica. En las madrigueras se pueden encontrar restos de cerámica	Hacia el este de la excavación se observa perturbación debida a madrigueras

Tabla 3.1. Estratigrafía y materiales encontrados en la Unidad de excavación 1 (Acosta, 2009).

A lo profundo de la capa IV, hacia el límite con la unidad de excavación 2, se observan bloques fuertemente endurecidos de ceniza, carbonato de calcio, huesos y carbón. De acuerdo a las excavaciones más recientes se piensa que este piso de la capa IV corresponde a un gran hogar del período de transición Pleistoceno-Holoceno y fue designado como elemento A-B (Acosta, 2009).

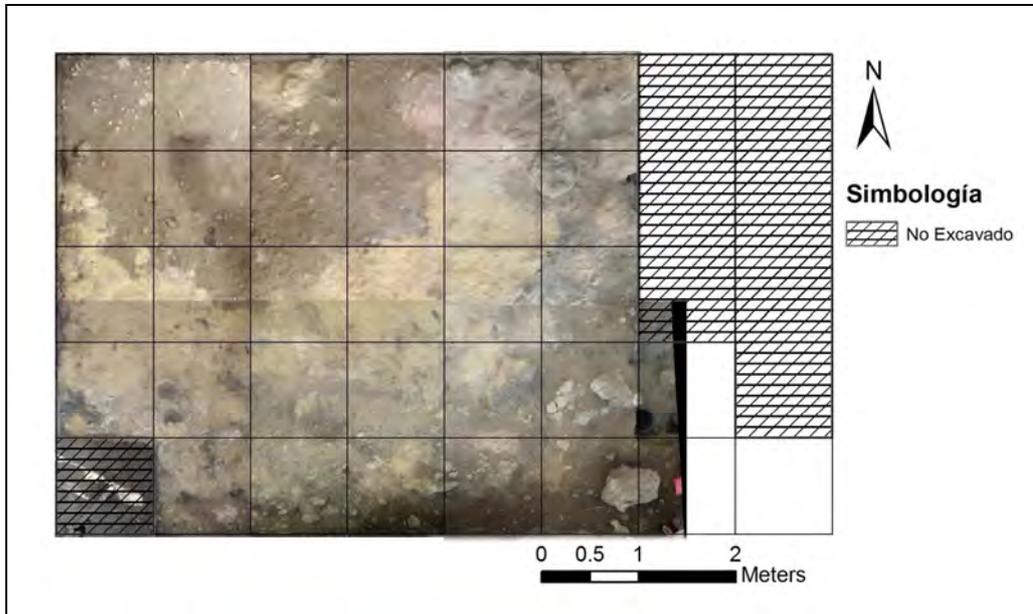


Figura 3.15. Fotoplano de excavación, capa IV nivel 2. Unidad 1. (Acosta, 2009)

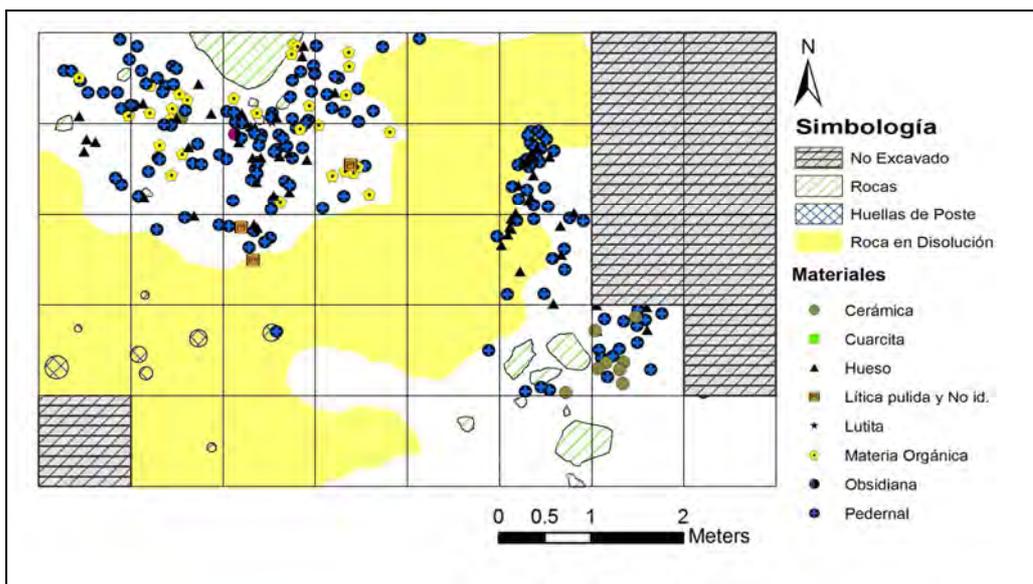


Figura 3.16. Distribución de artefactos y rasgos arqueológicos, capa IV nivel 2. Unidad 1 (Acosta, 2009)

Por las investigaciones que se han hecho en el sitio, Los Grifos se puede considerar como un campamento base. Un campamento base se define como el sitio central desde donde se realizan las actividades subsistenciales y reproductivas del grupo, originándose en estos las partidas de caza o recolección, procesamiento de materiales, manufactura y mantenimiento de la unidad social (Acosta, 2008)

Dentro del Proyecto Cazadores del Trópico Americano también se excavó la cueva de Santa Marta, previamente a los estudios en Los Grifos. Anteriormente se pensaba que Los Grifos y Santa Marta fueron contemporáneos con dos tradiciones tecnológicas diferentes, en Santa Marta de tipo expeditivo y en Los Grifos donde se empleaban puntas de proyectil más complejas. Sin embargo, en el marco del PCTA fue posible obtener cuatro fechas que anteceden en al menos un milenio a las fechas más tempranas en Los Grifos .

# CAPÍTULO 4. OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

## 4.1 Muestreo

Un total de 11 muestras fueron recolectadas durante 3 temporadas (2007, 2008 y 2009). La Figura 4.1 muestra los cuadros de donde se tomó cada muestra .



Figura 4.1. Distribución de las muestras en el área de excavación

TEMPORADA	MUESTRA	UNIDAD	CUADRO	CAPA	NIVEL
2007	LG01	1	N4E1	II	1
	LG02	1	N5E2	II	1
	LG03	2	N5E8	II	1
	LG04	2	N3E7	VI	2
2008	LG05	2	N3E7	VI	3,4 y 5
	LG06	1	N4E6	IV	3 y 4
	LG07 A, B y C	1	N3E6	IV	3

<b>2009</b>	LG08	3	N7E5	IV	3
	LG09	3	N7E6	IV	3
	LG10	1	(N3/N4)E6	IV	6
	LG11 A y B	1	N4E6	IV	6

Tabla 4.2 . Muestras tomadas con su ubicación espacial y estratigráfica en la excavación.

#### 4.1.1 Temporada 2007

En la temporada de 2007, fueron tomadas de la muestra LG01 a la LG04 por el pasante de arqueología Vicente Martínez Miranda.

Ésta fue la primera temporada del muestreo y de la excavación, por tanto las dos primeras muestras (LG01-02) obtenidas en ésta temporada corresponden a los niveles de ocupación más tardíos de la unidad de excavación 1. Las otras dos muestras (LG03-04) se tomaron de la unidad de excavación 2 que fue designada así ya que fue donde el INAH realizó excavaciones anteriormente. También, se dejaron pegados testigos de madera en roca madre de lo que sería la muestra LG05 (que posteriormente recuperamos en la temporada de 2008).

La muestra LG01, tomada el 13 de Noviembre de 2007 en el cuadro N4E1 Capa II nivel 1, consistió en un bloque de arena compactada. Se orientó en el sitio todo el bloque y se siguió el método descrita en la sección 2.2.1.2 de esta tesis para “Obtención de pisos o paredes completos”.

La muestra LG02 fue tomada el 15 de Noviembre de 2007 en el cuadro N5E2 Capa II nivel 1. La composición es de consolidado de arena y ceniza.

La muestra LG03 fue tomada el 15 de Noviembre de 2007 en el cuadro N5E8 Capa II nivel 1 de la unidad de excavación 2. Se tomó de un piso que se pensaba podría dar información acerca de las ocupaciones más tempranas del abrigo.

La muestra LG04 fue tomada el 17 de Noviembre de 2007 en la unidad de excavación 2, cuadro N3E7, Capa IV nivel 2. Ésta muestra se tomó del fogón del elemento A-B.



Figura 4.2. Consolidado de la muestra LG01  
(Foto: Vicente Martínez)



Figura 4.3 Muestra LG02 (Foto: Vicente Martínez)



Figura 4.4.. Muestra LG03 (Foto: Vicente Martínez)



Figura 4.5. Muestra LG03 antes de ser orientada (Foto: Vicente Martínez)

#### 4.2.2 Temporada 2008

En ésta temporada se tomaron 3 muestras, todas ellas alrededor del fogón del elemento A-B.

La muestra LG05 fue tomada el 22 de Noviembre de 2008 en el mismo cuadro que la LG04, sólo que en este caso los especímenes fueron tomados de los niveles 3, 4 y 5 de la capa IV. Toda la muestra fue tomada de roca madre. Los especímenes de ésta muestra se habían dejado pegados desde la temporada de 2007, siendo cubiertos por material de relleno todo un año.



Figura 4.6. Muestra LG05 .



Figura 4.7. Obteniendo la muestra LG05



Figura 4.8. Muestra LG06



Figura 4.9. Orientación de la muestra LG06



Figura 4.10. Orientación de la muestra LG07 sección A (Foto Vicente Martínez)



Figura 4.11. Muestra LG07 sección A antes de ser empacada para su transporte.



Figura 4.12. Muestra LG07 sección B



Figura 4.13. Muestra LG07 sección C

La muestra LG06 fue tomada el 21 de Noviembre de 2008 del cuadro N4E6, Capa IV Nivel 3 y 4<sup>1</sup>. Como se aprecia en la Figura 4.8 la composición de la muestra fue de conglomerados de arenisca.

La muestra LG06 fue tomada el 24 de Noviembre de 2008 del cuadro N3E6, Capa IV Nivel 3. Esta muestra consistió en tres secciones (A, B, C) y lo que se hizo fue un consolidado de material, ceniza y arena principalmente. Se utilizó pegamento blanco diluido con agua para consolidar las tres secciones, una vez secadas se prosiguió a orientar como se muestra en la Figura 4.10. Finalmente se siguió la metodología descrita en la sección 2.2.1.2 de esta tesis para “Obtención de pisos o paredes completos”.

### 3.4.3 Temporada 2009

En esta temporada se recolectaron 4 muestras en dos diferentes unidades de excavación; LG08 y LG09 se tomaron de la nueva unidad abierta en dicha temporada, la unidad de excavación 3, LG10 y LG11 se tomaron de la unida de excavación 1.

La muestra LG08 fue tomada el 1 de Abril de 2009 del cuadro N7E5, capa IV nivel 3. Se colocaron 10 testigos de madera sobre una superficie con restos orgánicos (raíces).

La muestra LG09 fue tomada el 1 de Abril de 2009 del cuadro N7E6, capa IV nivel 3. Se colocaron 13 testigos de madera sobre una superficie con restos orgánicos (raíces).

Tanto la muestra LG08 y LG09 no mostraban una clara exposición al fuego, sin embargo se tomaron las muestras con el objetivo de estudiar esa área más próxima a las paredes del abrigo.



Figura 4.14. Testigos de las muestras LG08 (acumulación derecha) y LG09 (acumulación izquierda)



Figura 4.15. Brújula marcando el norte geográfico junto a la muestra LG08 antes de ser orientada

<sup>1</sup> Los especímenes A, B, C, D y E (parte inferior derecha de la foto (a)) corresponden al nivel 4 y el resto de la muestra corresponde al nivel 3.



Figura 4.16. Orientando los testigos de la muestra LG09



Figura 4.17. Algunos testigos ya orientado de LG09



Figura 4.18. Brújula marcando el norte geográfico junto a la muestra LG10 antes de ser orientada



Figura 4.19. Muestra LG11 (Secciones A y B)

Debido a que las redes estereográficas de las muestras LG06 y LG07 mostraron mucho ruido (ver Apéndice, Tabla A.1), decidí tomar las muestras LG10 y LG11 de esos mismos cuadros.

La muestra LG10 se tomó el día 2 de Abril de 2009 de los cuadros (N3/N4)E6 Capa IV Nivel 6 , tres niveles más abajo que las muestras LG06 y LG07 tomadas en la temporada 2008. La composición de la muestra fue de ceniza compactada del fogón en lo que se definió como el elemento A-B<sup>2</sup>. Además de ceniza también se encontró mucho hueso y caracoles.

La muestra LG11 se tomó el día 8 de Abril de 2009 del cuadro N4E6 Capa IV Nivel 6 , 2 niveles más abajo que la muestra LG06 tomada en la temporada 2008. La composición de la muestra fue de ceniza y sedimento suelto del fogón en lo que se definió como el elemento A-B. Al ser ceniza y sedimento suelto lo que se hizo fue compactarla utilizando pegamento blanco diluido, de manera similar a la muestra LG07. La muestra consistió en dos secciones que se orientaron por separado y finalmente se siguió la metodología descrita en la sección 2.2.1.2 de esta tesis para “Obtención de pisos o paredes completos”.

---

<sup>2</sup> Ver sección 3.3.3

### 3.5 Preparación de los especímenes y medición



Figura 4.20. Preparación de las muestras, quitando el excedente con un esmeril de banco.

Todas las muestras se llevaron al Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica de la UNAM para obtener los especímenes. La metodología que se utilizó fue la misma descrita en la sección 2.2.2. El procesamiento de las muestras LG01-04 lo realicé como parte de mi servicio social en Enero de 2008. Las muestras LG05-07 las procesé en Enero de 2009 y las muestras LG08-11 en Mayo de 2009.

La medición de los especímenes se hizo con un Magnetómetro de Giro JR-6 (resolución de  $10^{-10}$  Am<sup>2</sup>) y un Desmagnetizador de campos alternos<sup>3</sup> en el LIMNA de la UNAM en Morelia, Michoacán. Las muestras LG01-07 las medí en Enero de 2009 y las muestras LG08-11 las medí en Julio del mismo año.

La metodología para la medición y el procesamiento de las muestras se puede seguir de las secciones 2.2.3 y 2.2.4 de ésta tesis.



Figura 4.21. Medición de un espécimen

---

<sup>3</sup> Ambos descritos en la sección 2.3.

---

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

---

### 5.1 Análisis de las muestras

Un total de 6 muestras, de 11 tomadas<sup>1</sup>, fueron utilizadas en el estudio. En la siguiente sección se muestra el análisis de cada muestra por separado, incluyendo los diagramas de Zijderveld y gráficas mostrando su espectro de desmagnetización. Finalmente se presentan las declinaciones y inclinaciones promedio por muestra.

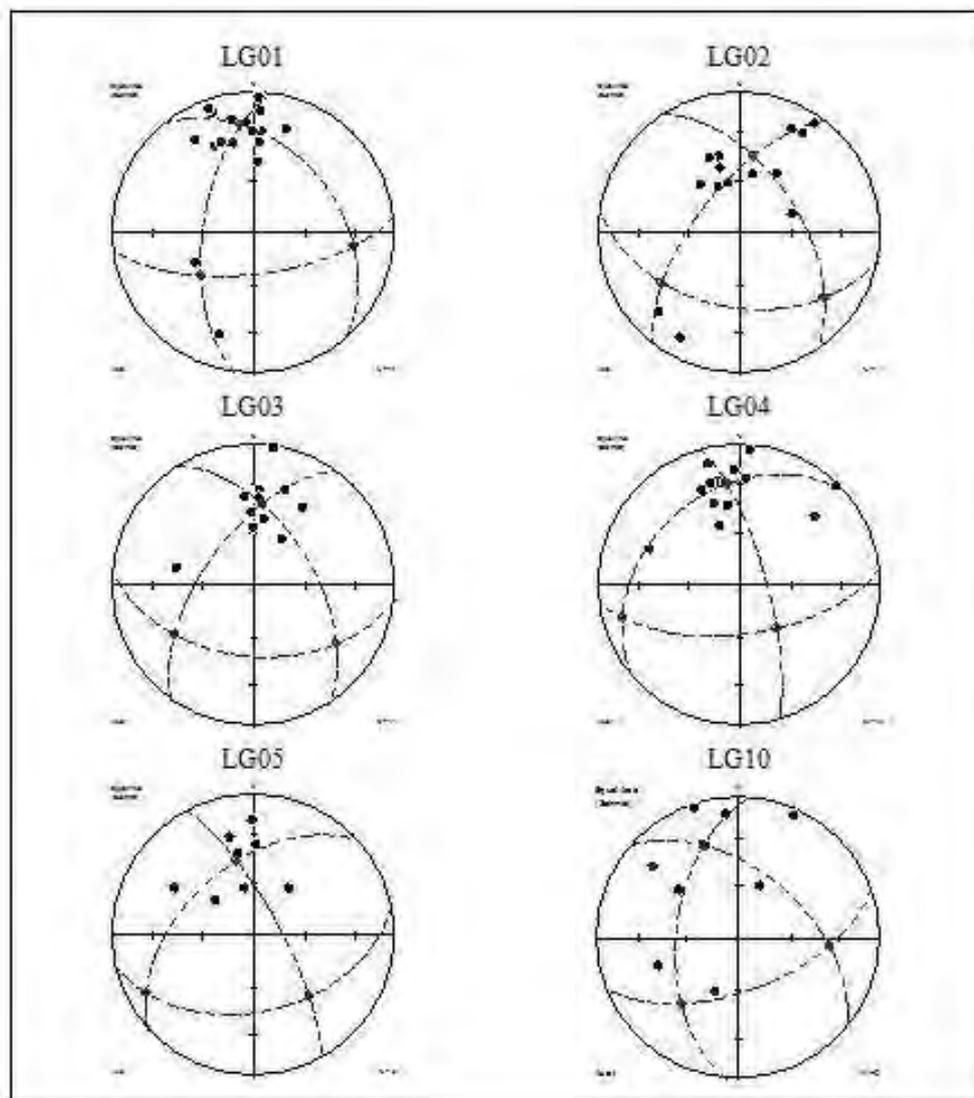
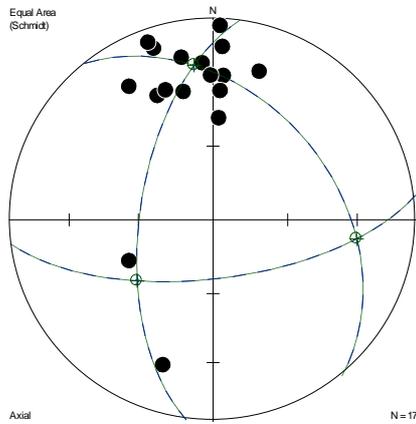


Figura 5.1. Red estereográfica de las direcciones de las magnetizaciones remanentes naturales de las muestras LG01, LG02, LG03, LG04, LG05 y LG06

---

<sup>1</sup> El análisis que se le hizo a las otras 5 muestras se puede encontrar en el apéndice.

### 5.1.1 LG01



Se tomaron 17 especímenes de la muestra LG01. En la Tabla 5.1 se muestran las direcciones de la NRM de los especímenes de la muestra LG01.

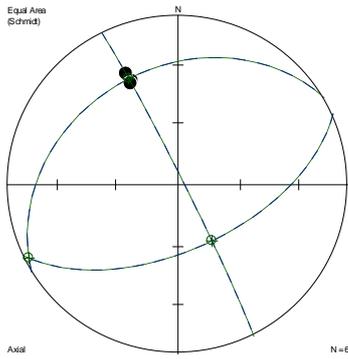
Figura 5.2. Red estereográfica de NRM para LG01

Especímen	Declinación	Inclinación
A	341	11
B	336	33
C	328	23
D	356	23
E	2	4
F	4	29
G	340	7
H	17	24
I	3	15
J	347	35
K	244	52
L	349	19
M	340	32
N	19	-25
O	359	29
P	3	48
Q	3	36

Tabla 5.1. NRM de los especímenes de la muestra LG01.

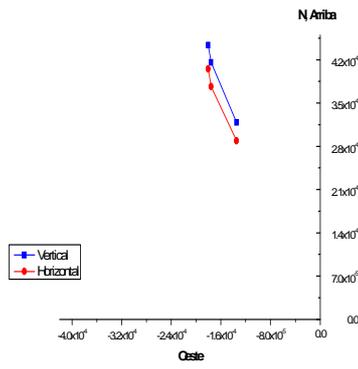
Los especímenes que se seleccionaron para ser desmagnetizados fueron B, C, G, H, I y L. Todos los pilotos se encontraban en el agrupamiento. A continuación se presenta la red estereográfica para cada especímen, su diagrama de Zijderveld y su espectro de desmagnetización.

### Red Estereográfica



Dec = 335.4

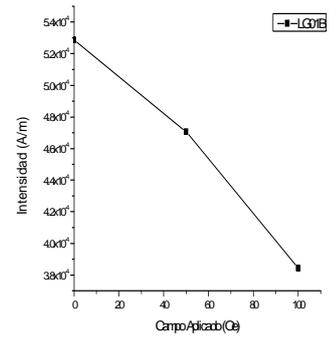
### Diagrama de Zijderveld



Promedio

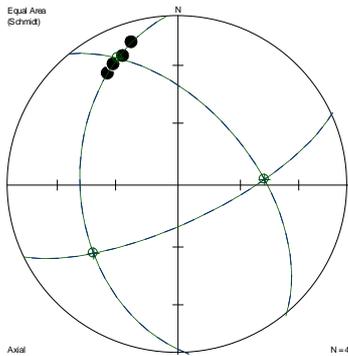
Tabla 5.2 LG01B

### Intensidad Vs Campo



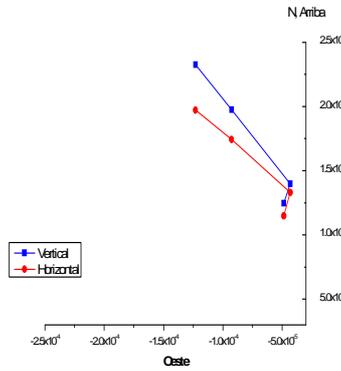
Inc = 31.7

### Red Estereográfica



Dec=334.9

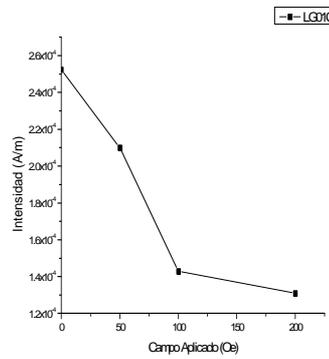
### Diagrama de Zijderveld



Promedio

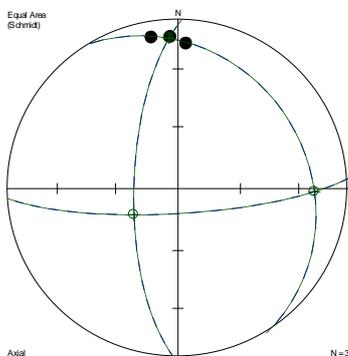
Tabla 5.3 LG01C

### Intensidad Vs Campo



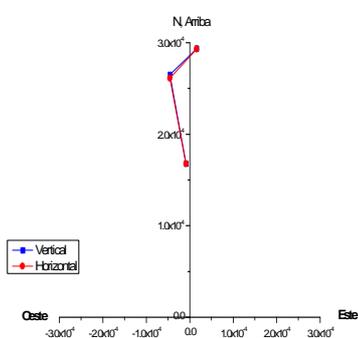
Inc=18.3

### Red Estereográfica



Dec = 357

### Diagrama de Zijderveld

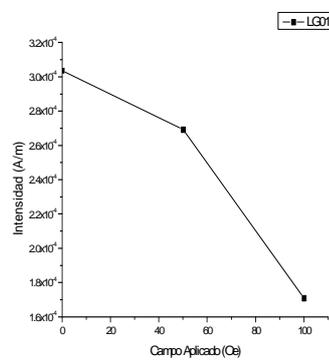


Promedio

Inc = 12.7

Tabla 5.4 LG01I

### Intensidad Vs Campo



Al realizar el análisis de las redes estereográficas, diagramas de Zijderveld y los espectros de desmagnetización de los especímenes G, H y L, se determinó sólo utilizar la dirección correspondiente a un valor determinado de desmagnetización<sup>2</sup> ya que no era posible continuar midiendo debido al porcentaje de error que presentaban.

**LG01G**

Tomando las mediciones de declinación e inclinación para la NRM (Campo=0)

Dec = 340

Inc = 7

**LG01H**

Tomando las mediciones de declinación e inclinación para la desmagnetización de 200 Oe

Dec = 351

Inc = 21

**LG01L**

Tomando las mediciones de declinación e inclinación para la desmagnetización de 50 Oe

Dec = 336

Inc = 36

Tabla 5.5 Especímenes de la muestra LG01 de los cuáles sólo se tomó una dirección.

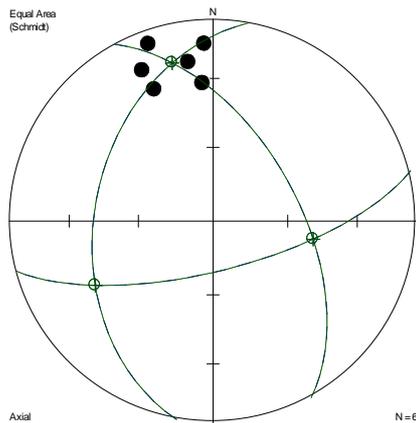


Figura 5.3. Red estereográfica correspondiente a los especímenes seleccionados de la muestra LG01.

Las redes estereográficas de los especímenes B, C e I muestran un agrupamiento y sus diagramas de Zijderveld muestran una dirección tendiente al origen. Las gráficas de espectro de desmagnetización se comportaron de acuerdo a lo esperado.

Para obtener la dirección promedio de la muestra se utilizó estadística de Fisher (programa FISH2.BAS) con las direcciones mostradas en la Tabla 5.6, el resultado se muestra en la Tabla 5.7.

<sup>2</sup> Su red estereográfica, diagrama de Zijderveld y su gráfica intensidad Vs Campo puede observarse en el Apéndice (A.2).

Especímen	Declinación	Inclinación	MAD <sup>3</sup>
B	355.4	31.7	2.6
C	334.9	18.3	4.96
G	340	7	NRM
H	351	21	Desmagnetización de 200 Oe
I	357	12.7	6.3
L	336	36	Desmagnetización de 50 Oe

Tabla 5.6. Resumen de los especímenes seleccionados de la muestra LG01 para el análisis.

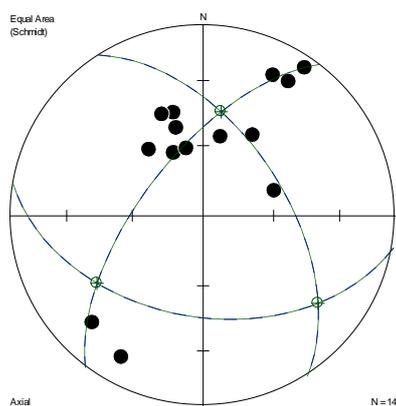
La dirección característica de la muestra LG01, así como los parámetros R, k y el intervalo de confianza  $\alpha_{95}$  se muestra en la siguiente tabla:

N	Dec Promedio	Inc Promedio	R	k	$\alpha_{95}$
6	345.8	21.3	5.84	31.96	9.38 <sup>4</sup>

Tabla 5.7. Resultados de la muestra LG01. N es el número de especímenes, R es la resultante, k el parámetro de precisión y  $\alpha_{95}$  es el intervalo de confianza.

Al intervalo de confianza  $\alpha_{95}$  se le hizo una corrección conocida como “Corrección de Demarest” (Demarest, 1983) ajustando su valor conforme al número de especímenes (N) en el análisis.

### 5.1.2 LG02



Se tomaron 14 especímenes de la muestra LG02. En la Tabla 5.8 se muestran las direcciones de la NRM de los especímenes de la muestra LG02.

Figura 5.4. Red estereográfica de NRM para LG02

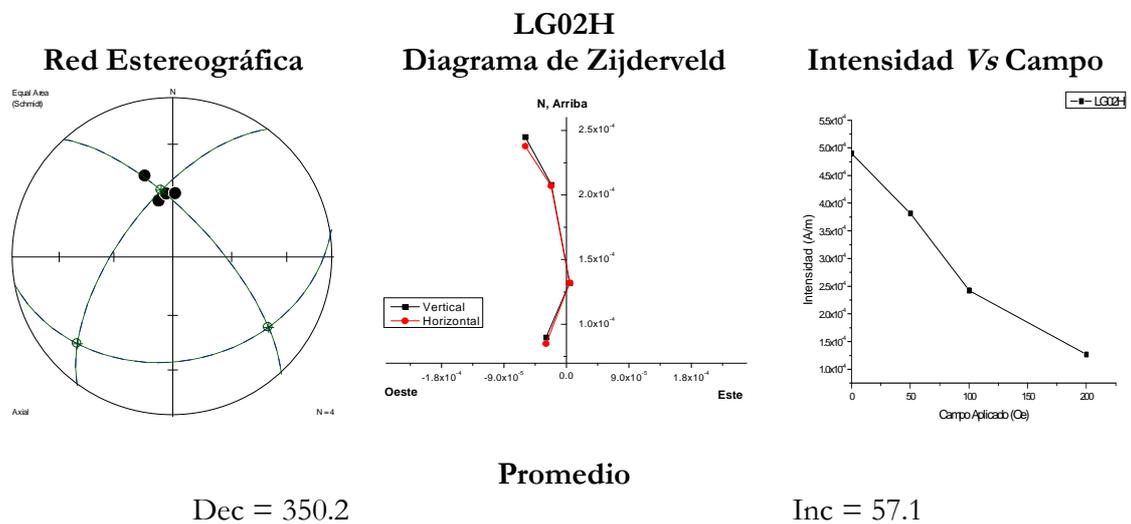
<sup>3</sup> Maxima Angular Deviation.

<sup>4</sup> Con corrección de Demarest (Demarest, 1983)

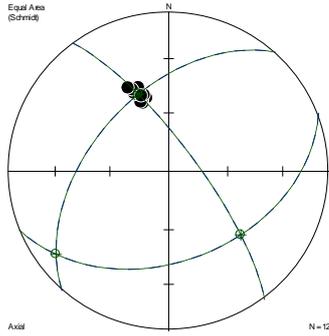
Especímen	Declinación	Inclinación
A	335	60
B	164	-43
C	34	7
D	32	18
E	321	53
F	12	55
G	226	21
H	346	60
I	26	19
J	250	-58
K	343	50
L	338	42
M	31	49
N	30	-16

Tabla 5.8. NRM de los especímenes de la muestra LG02.

Se eligieron para ser desmagnetizados los especímenes E, F, H, K, L y M, todos dentro del agrupamiento mostrado en la red estereográfica. A continuación se presenta la red estereográfica para cada especímen, su diagrama de Zijdeveld y espectro de desmagnetización.

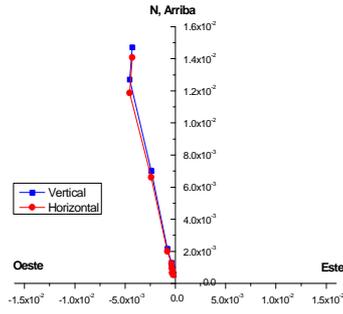


### Red Estereográfica



Dec = 348.6

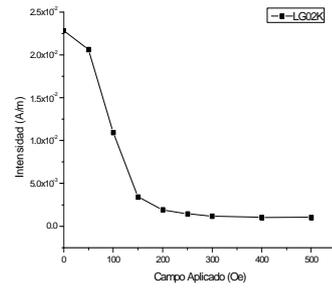
### Diagrama de Zijderveld



Promedio

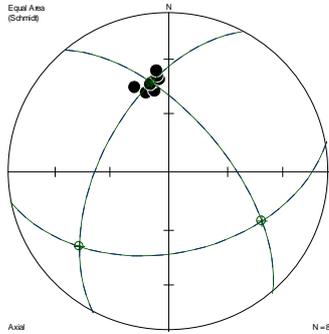
Tabla 5.10. LG02K

### Intensidad Vs Campo



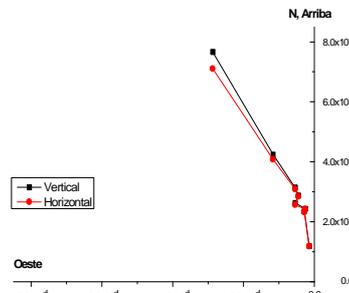
Inc = 52

### Red Estereográfica



Dec = 349

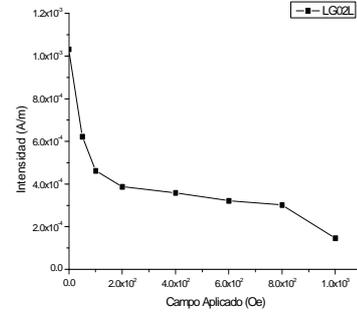
### Diagrama de Zijderveld



Promedio

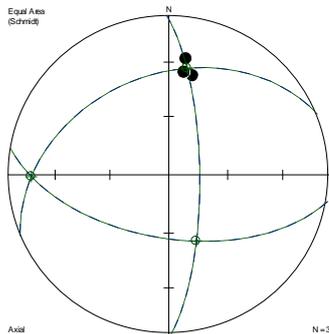
Tabla 5.11. LG02L

### Intensidad Vs Campo



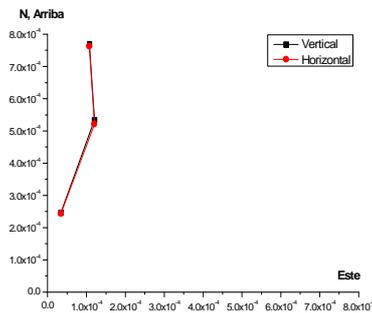
Inc = 45.3

### Red Estereográfica



Dec = 359.3

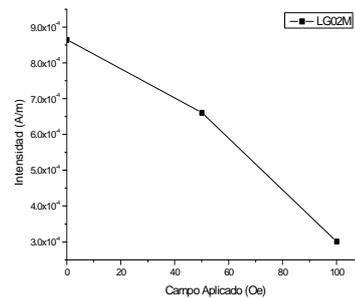
### Diagrama de Zijderveld



Promedio

Tabla 5.12. LG02M

### Intensidad Vs Campo



Inc = 52.9

Al realizar el análisis de las redes estereográficas, diagramas de Zijderveld y espectro de desmagnetización de los especímenes E y F se determinó sólo utilizar la NRM de las mismas por la dispersión que mostraban<sup>5</sup>.

#### LG02E

Tomando las mediciones de declinación e inclinación para la NRM (Campo=0)

Dec = 346

Inc = 66

#### LG02F

Tomando las mediciones de declinación e inclinación para la NRM (Campo=0)

Dec = 358

Inc = 59

Tabla 5.13. Especímenes de la muestra LG02 de los cuáles sólo se tomó una dirección.

Los especímenes H, K, L y M muestran agrupamiento en sus redes estereográficas y sus diagramas de Zijderveld muestran una tendencia hacia el origen. Las gráficas de espectro de desmagnetización se comportaron de acuerdo a lo esperado.

Se seleccionaron todos los especímenes pilotos para ser analizados con estadística de Fisher utilizando el programa FISH2.BAS; los especímenes H, K, L y M tomando la dirección promedio y de los especímenes E y F se tomaron sólo las direcciones mostradas en la Tabla 5.13.

La Tabla 5.14 muestra las declinaciones e inclinaciones promedio y MAD de los especímenes seleccionados.

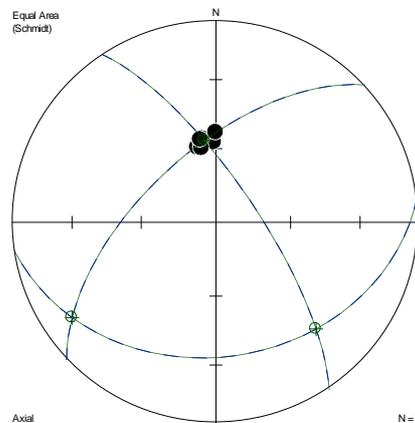


Figura 5.5. Red estereográfica correspondiente a los especímenes seleccionados de la muestra LG02.

<sup>5</sup> Su red estereográfica, diagrama de Zijderveld y su gráfica intensidad Vs Campo puede observarse en el Apéndice (A.2).

Especímen	Declinación	Inclinación	MAD
E	346	66	NRM
F	358	59	NRM
H	350.2	57.1	6.43
K	348.6	52	1.84
L	349	45.3	3.27
M	359.3	52.9	4.95

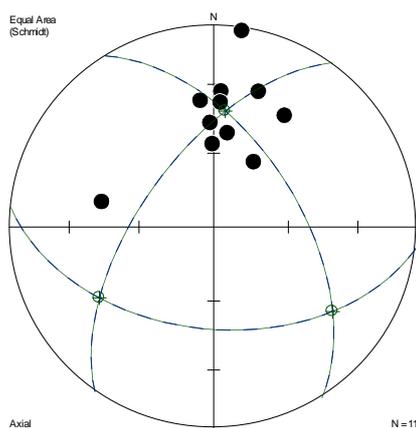
Tabla 5.14. Resumen de los especímenes seleccionados de la muestra LG02 para entrar al análisis.

La dirección característica de la muestra LG02, así como los parámetros R, k y el intervalo de confianza  $\alpha_{95}$  se muestra en la siguiente tabla:

N	Dec Promedio	Inc Promedio	R	k	$\alpha_{95}$
6	352	55.5	5.95	109.57	5.00 <sup>6</sup>

Tabla 5.15. Resultados de la muestra LG02. N es el número de especímenes, R es la resultante, k el parámetro de precisión y  $\alpha_{95}$  es el intervalo de confianza.

### 5.1.3 LG03



Se tomaron 12 especímenes de la muestra LG03 de los cuáles uno (I) se dañó durante el procesamiento. En la Tabla 5.16 se muestran las declinaciones e inclinaciones de la NRM de los especímenes de la muestra LG03.

Figura 5.6. Red estereográfica de NRM para LG03

<sup>6</sup> Con corrección de Demarest (Demarest, 1983)

Especímen	Declinación	Inclinación
A	32	35
B	3	33
C	359	56
D	3	38
E	8	51
F	31	59
G	18	30
H	8	2
I	Desechada al dañarse durante el procesamiento	
J	358	47
K	354	37
L	283	43

Tabla 5.16. NRM de los especímenes de la muestra LG03.

El especímen L notablemente está alejado del agrupamiento por lo cuál se le desmagnetizará para ver hacia donde tiende su dirección. Además del especímen L se eligieron B, E, J y K para el análisis.

A continuación se presenta la red estereográfica para cada especímen, su diagrama de Zijderveld y su espectro de desmagnetización.

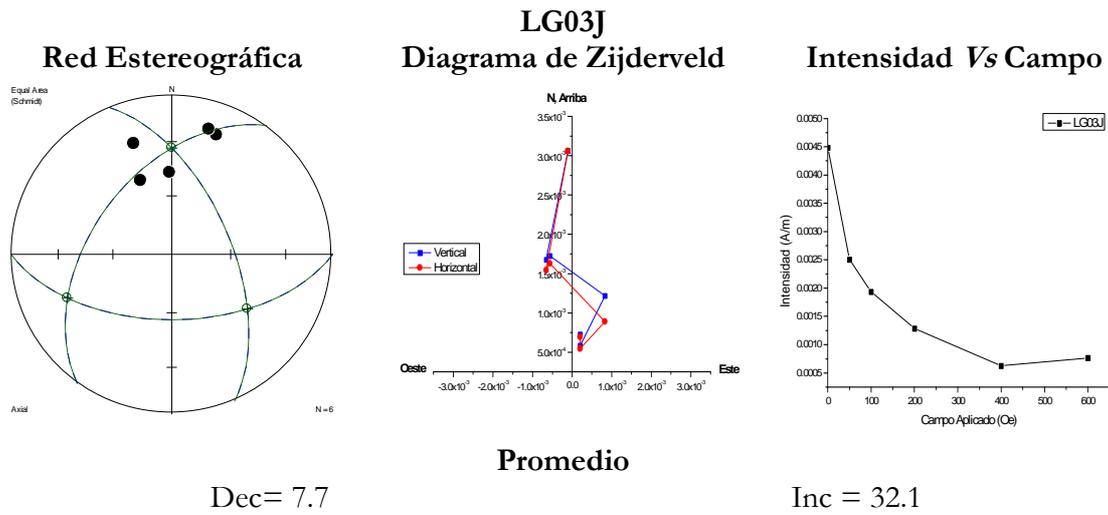
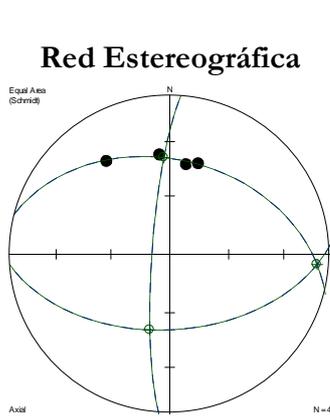
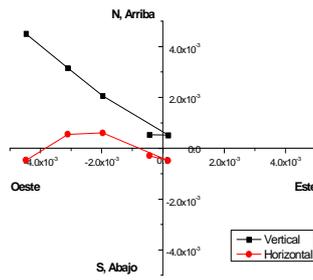


Tabla 5.17. LG03J



Dec= 356.5

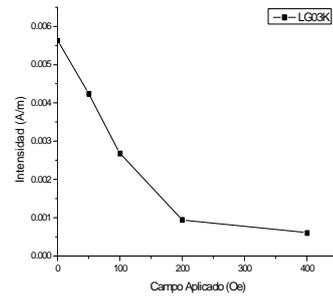
### LG03K Diagrama de Zijderveld



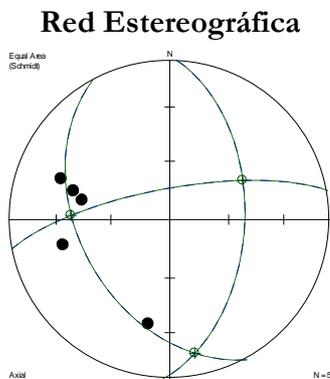
Promedio

Tabla 5.18. LG03K

### Intensidad Vs Campo

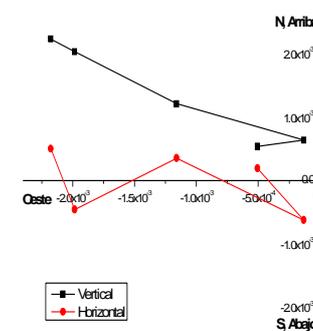


Inc = 39



Dec= 3

### LG03L Diagrama de Zijderveld

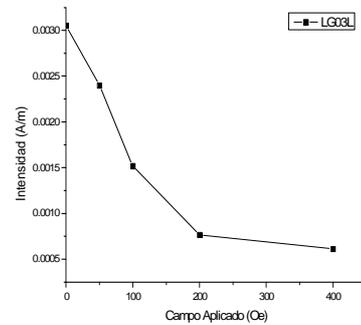


Plano principal

Inc = 52

Tabla 5.19 LG03L

### Intensidad Vs Campo



MAD = 11.37

Al observar el comportamiento de los especímenes B y E durante la desmagnetización se determinó sólo utilizar la NRM<sup>7</sup>.

### LG03B

Tomando las mediciones de declinación e inclinación para la NRM (Campo=0)

Dec = 3

Inc = 33

### LG03E

Tomando las mediciones de declinación e inclinación para la NRM (Campo=0)

Dec = 8

Inc = 51

Tabla 5.20. Especímenes de la muestra LG03 de los cuáles sólo se tomó una dirección.

Los especímenes J y K mostraron una tendencia hacia el origen en su diagrama de Zijderveld y las gráficas de espectro de desmagnetización se comportaron de acuerdo a lo esperado. Ambos especímenes decidimos que entraran al análisis con su dirección

<sup>7</sup> Su red estereográfica, diagrama de Zijderveld y su gráfica intensidad Vs Campo puede observarse en el Apéndice (A.2).

promedio. El espécimen L, que se encontraba alejado del resto de la muestra, al desmagnetizarse se observó que no se acumuló alrededor de la NRM. Se tomó del espécimen L la dirección del plano principal ya que es similar a los valores promedio del resto de la muestra.

Además de los especímenes antes mencionados se seleccionaron las direcciones de NRM de los especímenes B y E para realizar la estadística de Fisher utilizando el programa FISH2.BAS.

La tabla 5.21 muestra las declinaciones e inclinaciones promedio y MAD de los especímenes seleccionados.

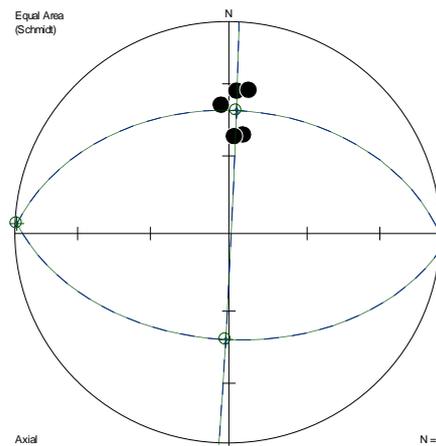


Figura 5.7. Red estereográfica correspondiente a los especímenes seleccionados de la muestra LG03.

<b>Especímen</b>	<b>Declinación</b>	<b>Inclinación</b>	<b>MAD</b>
<b>B</b>	3	33	NRM
<b>E</b>	8	51	NRM
<b>J</b>	7.7	32.1	17.28
<b>K</b>	356.5	39	6.24
<b>L</b>	3	52	11.37

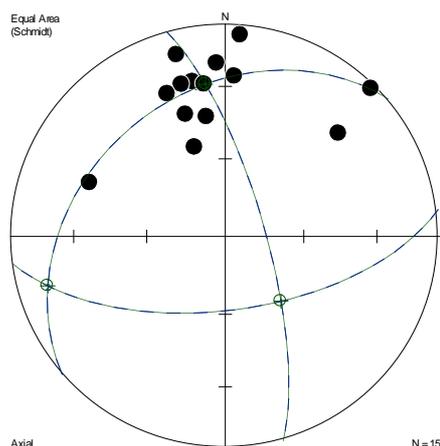
Tabla 5.21. Resumen de los especímenes seleccionados de la muestra LG03 para entrar al análisis.

La dirección característica de la muestra LG03, así como los parámetros R, k y el intervalo de confianza  $\alpha_{95}$  se muestra en la siguiente tabla:

<b>N</b>	<b>Dec Promedio</b>	<b>Inc Promedio</b>	<b>R</b>	<b>k</b>	$\alpha_{95}$
5	3.6	41.5	4.94	63.13	7.61 <sup>8</sup>

Tabla 5.22. Resultados de la muestra LG03. N es el número de especímenes, R es la resultante, k el parámetro de precisión y  $\alpha_{95}$  es el intervalo de confianza.

### 5.1.4 LG04



Se tomaron 15 especímenes de la muestra LG04. En la tabla siguiente se muestran las direcciones de la NRM de los especímenes de la muestra LG04.

Figura 5.8. Red estereográfica de NRM para LG04

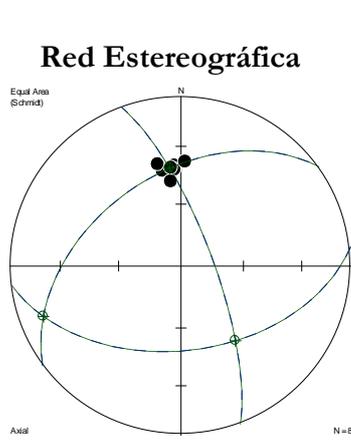
<b>Especímen</b>	<b>Declinación</b>	<b>Inclinación</b>
<b>A</b>	351	42
<b>B</b>	47	29
<b>C</b>	4	5
<b>D</b>	44	3
<b>E</b>	350	27
<b>F</b>	341	53
<b>G</b>	348	26
<b>H</b>	352	28
<b>I</b>	342	39
<b>J</b>	345	12
<b>K</b>	344	26
<b>L</b>	292	32
<b>M</b>	338	28
<b>N</b>	357	19
<b>O</b>	3	25

Tabla 5.22. NRM de los especímenes de la muestra LG04.

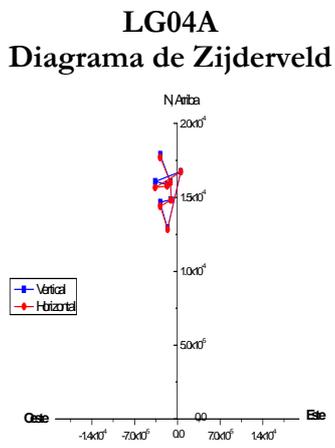
Se aprecia en la red estereográfica una acumulación de las NRM de los especímenes. Los especímenes que se seleccionaron del agrupamiento para ser desmagnetizados fueron A, E, G, H, J, K y M. El espécimen L es uno de los tres especímenes más alejados por lo cuál se le desmagnetizará para observar su comportamiento.

<sup>8</sup> Con corrección de Demarest (Demarest, 1983)

A continuación se presenta la red estereográfica para cada espécimen, su diagrama de Zijdeveld y su gráfica de espectro de desmagnetización.

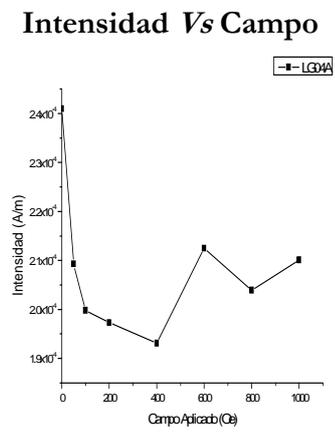


Dec = 354

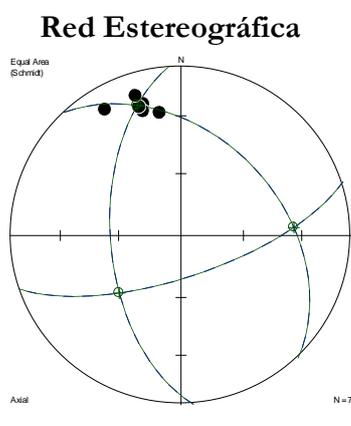


Promedio

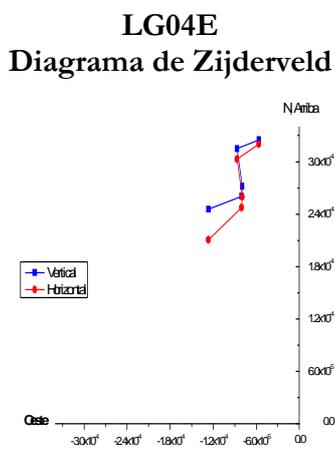
Tabla 5.23 LG04A



Inc = 41

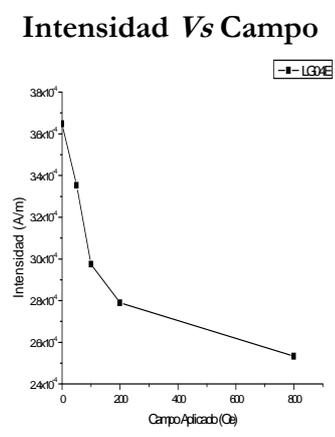


Dec = 341.7



Promedio

Tabla 5.24. LG04E



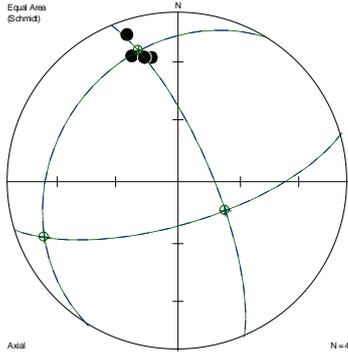
Inc = 20.7

Red Estereográfica

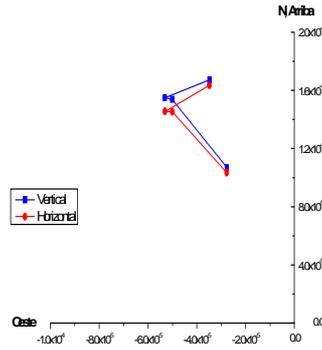
Diagrama de Zijdeveld

Intensidad Vs Campo

LG04G

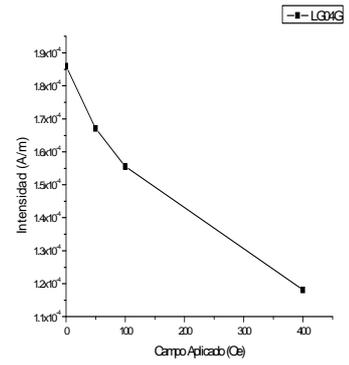


Dec = 343.1

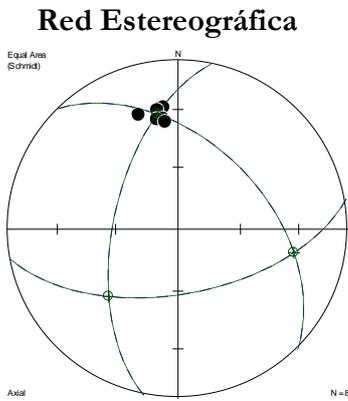


Promedio

Tabla 5.25 LG04G

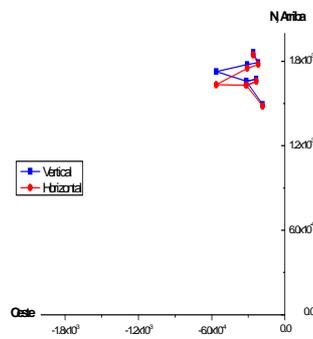


Inc = 20.6



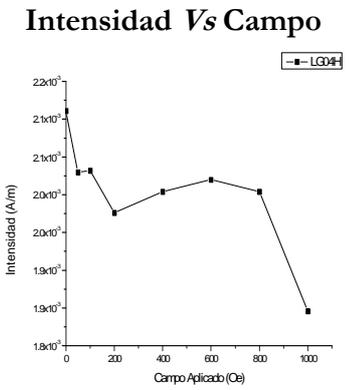
Dec = 349.9

**LG04H**  
Diagrama de Zijderveld

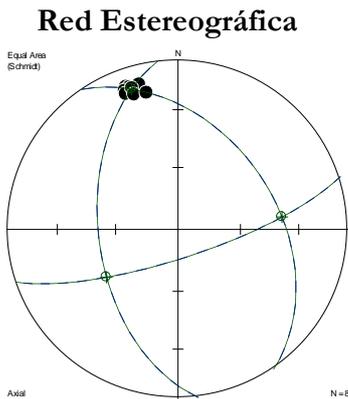


Promedio

Tabla 5.26 LG04H

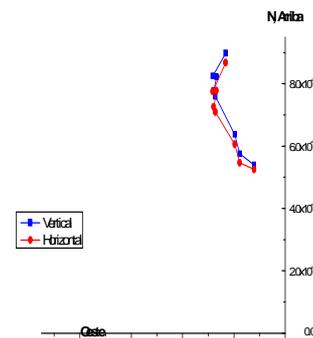


Inc = 31.4



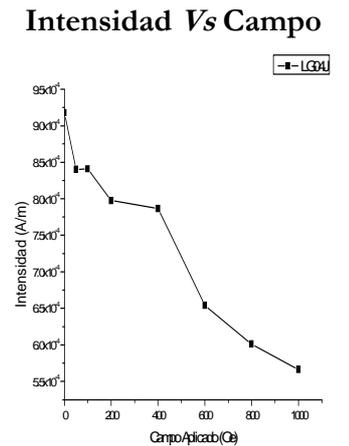
Dec = 341.7

**LG04J**  
Diagrama de Zijderveld



Promedio

Tabla 5.27 LG04J

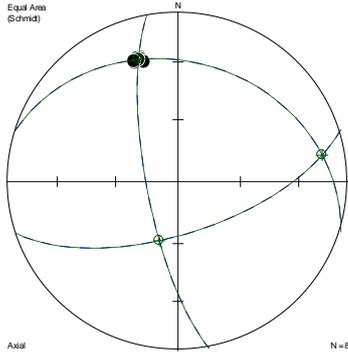


Inc = 13.3

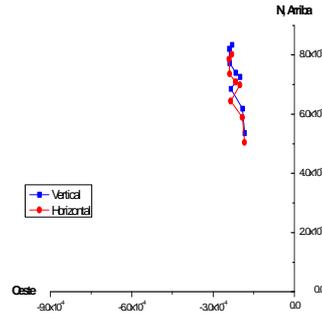
**Red Estereográfica**

**LG04K**  
Diagrama de Zijderveld

**Intensidad Vs Campo**

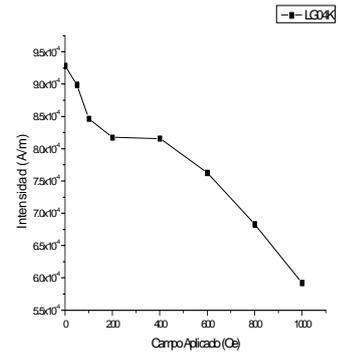


Dec = 342.2

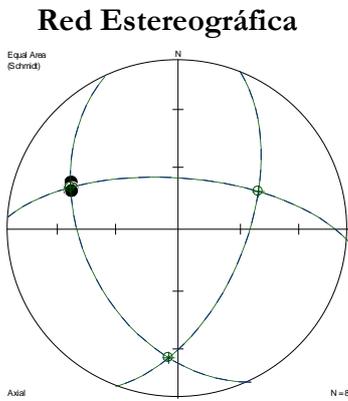


Promedio

Tabla 5.28 LG04K

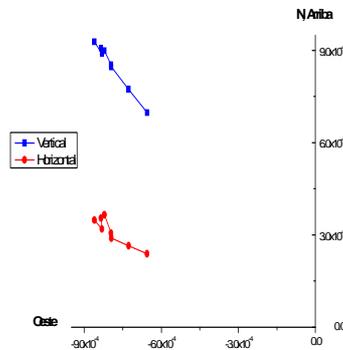


Inc = 25.3



Dec = 291.8

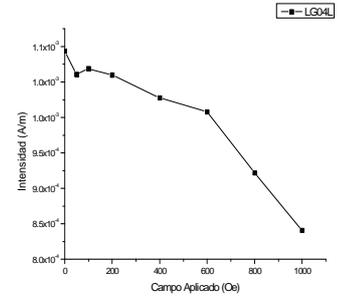
**LG04L**  
**Diagrama de Zijderveld**



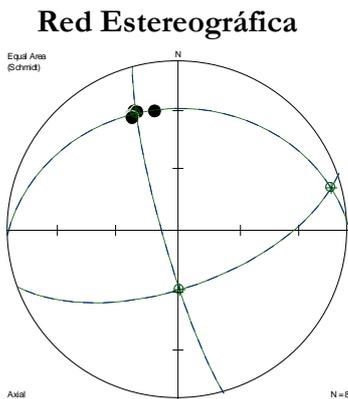
Promedio

Tabla 5.29 LG04L

**Intensidad Vs Campo**  
**Observaciones: Probable error de medición.**

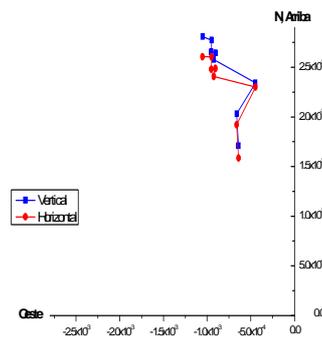


Inc = 32.9



Dec = 340.6

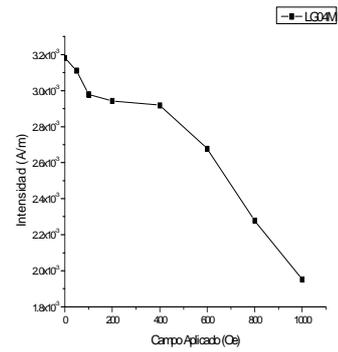
**LG04M**  
**Diagrama de Zijderveld**



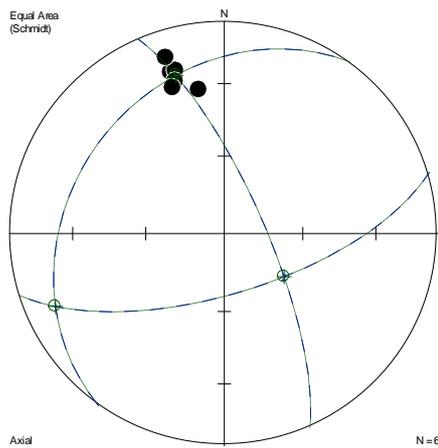
Promedio

Tabla 5.30 LG04M

**Intensidad Vs Campo**



Inc = 27.6



El espécimen A muestra un aumento en la intensidad y un diagrama de Zijderveld anómalo, por lo cuál fue retirado del estudio. El espécimen L, que antes de desmagnetizarse se mostraba alejado del comportamiento de la muestra continuó igual al ser desmagnetizado. Lo anterior lo atribuimos a un error en la orientación en el sitio y por tanto es retirado del análisis. El espécimen E muestra un diagrama de Zijderveld anómalo, pero su dirección promedio coincidía con el resto de los especímenes desmagnetizados por lo cuál si se tomó en cuenta en el estudio.

Figura 5.9. Red estereográfica correspondiente a los especímenes seleccionados de la muestra LG04.

El resto de los especímenes pilotos (G, H, J, K y M) mostraron una dirección tendiente al origen en su diagrama de Zijderveld y una disminución en su intensidad a medida que aumentaba el campo aplicado.

La Tabla 5.31 muestra las declinaciones e inclinaciones promedio y MAD de los especímenes seleccionados.

Especímen	Declinación	Inclinación	MAD
<b>E</b>	341.7	20.7	8.2
<b>G</b>	343.4	20.6	6.6
<b>H</b>	349.9	31.4	4.4
<b>J</b>	341.7	13.3	3.1
<b>K</b>	342.2	25.3	1.5
<b>M</b>	340.6	27.6	2.9

Tabla 5.31. Resumen de los especímenes seleccionados de la muestra LG04 para entrar al análisis.

La dirección característica de la muestra LG04, así como los parámetros R, k y el intervalo de confianza  $\alpha_{95}$  se muestra en la siguiente tabla:

<b>N</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>	<b>R</b>	<b>k</b>	$\alpha_{95}$
	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>			
6	343.2	23.2	5.96	132.83	4.55 <sup>9</sup>

Tabla 5.32. Resultados de la muestra LG04. N es el número de especímenes, R es la resultante, k el parámetro de precisión y  $\alpha_{95}$  es el intervalo de confianza.

### 5.1.5 LG05

Se tomaron 9 especímenes de la muestra LG05, de los cuáles uno (D) se desechó, probablemente debido a un error en la orientación del mismo en el sitio de muestreo.

En la Tabla 5.33 se muestran las direcciones de las NRM de los especímenes de la muestra LG05.

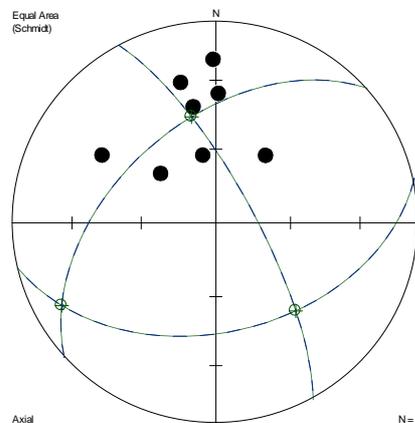


Figura 5.10. Red estereográfica de NRM para LG05

<b>Especímen</b>	<b>Declinación</b>	<b>Inclinación</b>
<b>A</b>	301	35
<b>B</b>	349	41
<b>C</b>	346	29
<b>D</b>	Desechada por mala orientación	
<b>E</b>	36	56
<b>F</b>	312	60
<b>G</b>	1	36
<b>H</b>	359	20
<b>I</b>	349	62

Tabla 5.33. NRM de los especímenes de la muestra LG05.

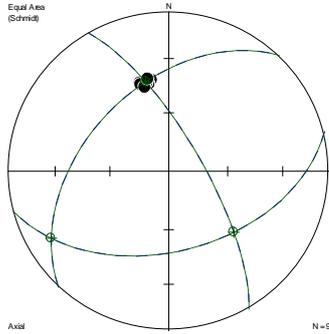
Podemos observar que los especímenes B, C, G y H<sup>10</sup> se encuentran más agrupados que el resto. Se eligieron para desmagnetizar B, C, G, E, F e I, los últimos tres con el objetivo de ver si al desmagnetizarse se acercaban al agrupamiento.

<sup>9</sup> Con corrección de Demarest (Demarest, 1983)

<sup>10</sup> El espécimen H mostró una intensidad de  $192 \times 10^{-3}$  A/m por lo que no fue conveniente desmagnetizarlo.

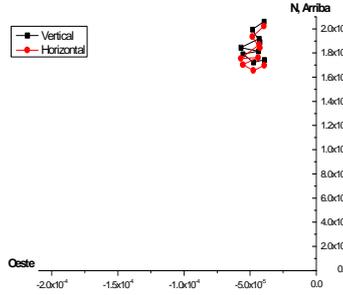
A continuación se presenta la red estereográfica para cada espécimen piloto, su diagrama de Zijderveld y su gráfica de espectro de desmagnetización.

### Red Estereográfica



Dec= 345.6

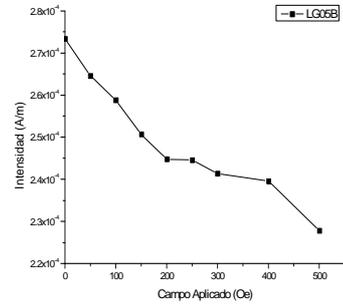
### LG05B Diagrama de Zijderveld



Promedio

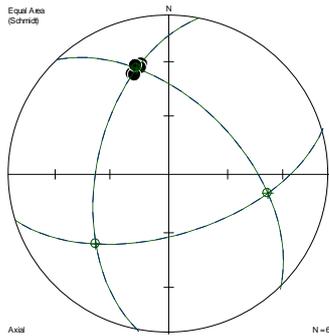
Tabla 5.34. LG05B

### Intensidad Vs Campo



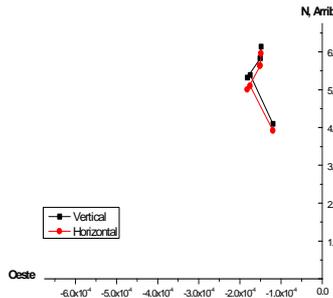
Inc = 41.6

### Red Estereográfica



Dec= 343.4

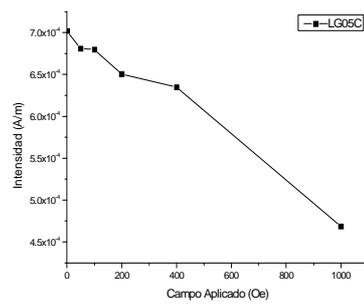
### LG05C Diagrama de Zijderveld



Promedio

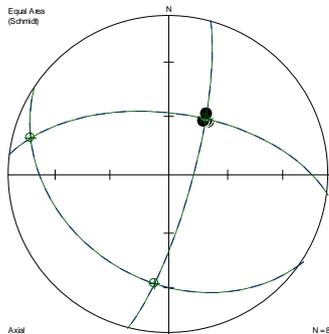
Tabla 5.35 LG05C

### Intensidad Vs Campo



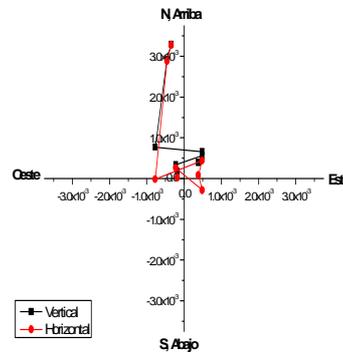
Inc = 31.2

### Red Estereográfica



Dec= 33.1

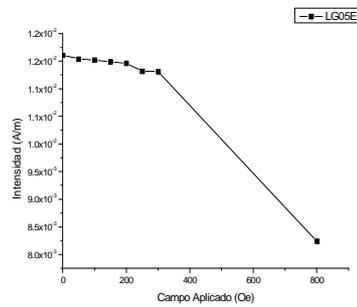
### LG05E Diagrama de Zijderveld



Promedio

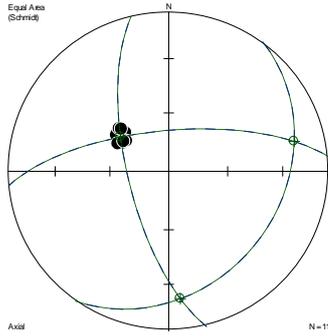
Tabla 5.36 LG05E

### Intensidad Vs Campo



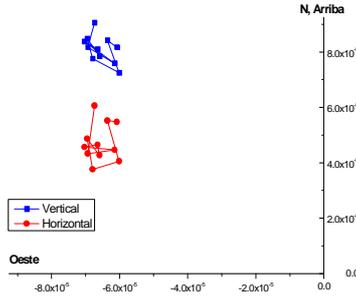
Inc = 55.5

### Red Estereográfica



Dec= 305.8

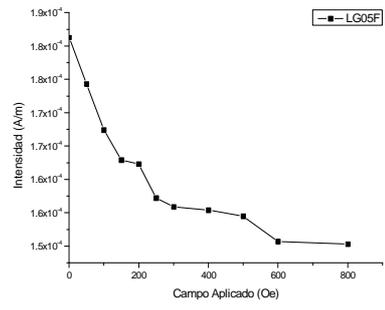
### LG05F Diagrama de Zielderveld



Promedio

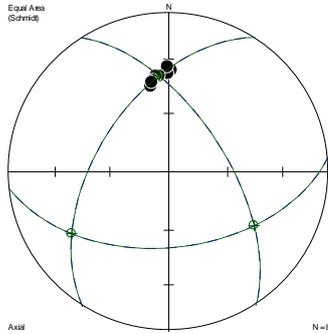
Tabla 5.37 LG05F

### Intensidad Vs Campo



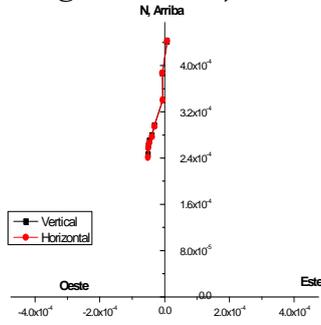
Inc = 59.7

### Red Estereográfica



Dec= 354.2

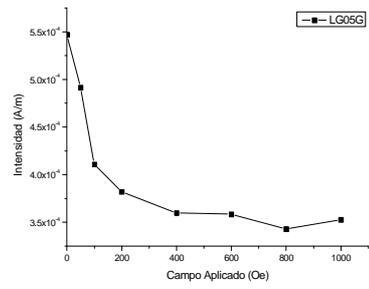
### LG05G Diagrama de Zielderveld



Promedio

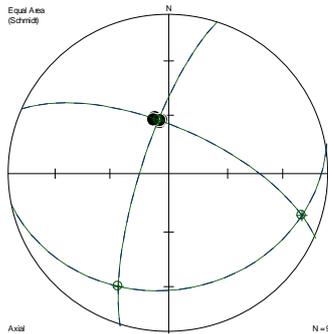
Tabla 5.38 LG05G

### Intensidad Vs Campo



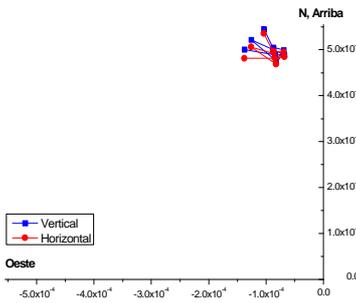
Inc = 39.2

### Red Estereográfica



Dec= 349.2

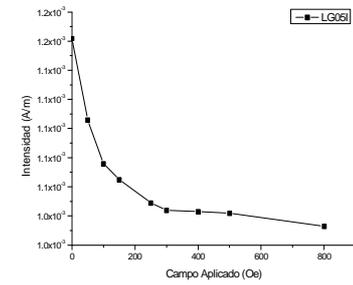
### LG05I Diagrama de Zielderveld



Promedio

Tabla 5.39 LG05I

### Intensidad Vs Campo



Inc = 61.9

Con las redes estereográficas de cada espécimen desmagnetizado se observó que no hubieron variaciones abruptas de dirección; todos los especímenes se acumularon alrededor de su NRM. Los tres especímenes que estaban agrupados (B, C y G) lo siguieron estando y los alejados no cambiaron su comportamiento al ser desmagnetizados.

Se desecharon los especímenes E, F e I por estar alejados del agrupamiento además de que los diagramas de Zijderveld de los especímenes F e I fueron anómalos y la gráfica del espectro de desmagnetización del espécimen E parece no variar hasta la desmagnetización de 800 Oe.

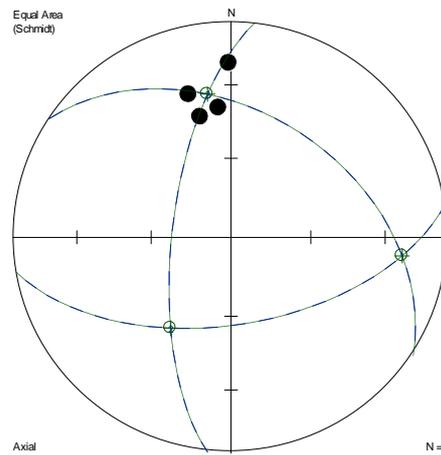


Figura 5.11. Red estereográfica correspondiente a los especímenes seleccionados de la muestra LG05.

Se seleccionaron los especímenes B, C, G y H<sup>11</sup> para ser analizados con estadística de Fisher utilizando el programa FISH2.BAS

La Tabla 5.40 muestra las declinaciones e inclinaciones promedio y MAD de los especímenes seleccionados.

Especímen	Declinación	Inclinación	MAD
B	345.6	41.6	1.20
C	343.4	31.2	1.60
G	354.2	39.2	2.47
H	359	20	NRM

Tabla 5.40. Resumen de los especímenes seleccionados de la muestra LG05 para entrar al análisis.

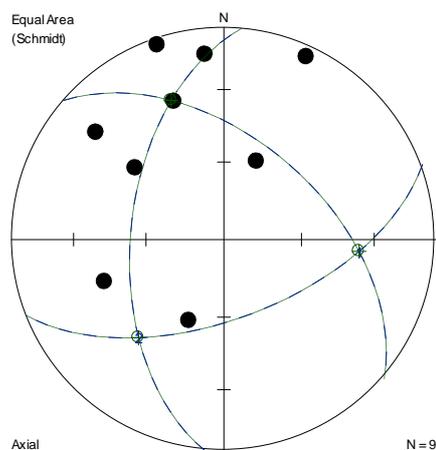
La dirección característica de la muestra LG04, así como los parámetros R, k y el intervalo de confianza  $\alpha_{95}$  se muestra en la siguiente tabla:

<sup>11</sup> El espécimen H, sin haber sido desmagnetizado, fue también utilizado para el análisis debido a que el resto de los especímenes mostró una acumulación alrededor de la NRM.

<b>N</b>	<b>Dec</b> <b>Promedio</b>	<b>Inc</b> <b>Promedio</b>	<b>R</b>	<b>k</b>	$\alpha_{95}$
4	350.8	33.2	3.94	49.22	10.05 <sup>12</sup>

Tabla 5.41. Resultados de la muestra LG05. N es el número de especímenes, R es la resultante, k el parámetro de precisión y  $\alpha_{95}$  es el intervalo de confianza.

### 5.1.6 LG10



Se tomaron 10 especímenes de la muestra LG10 de los cuáles uno (F) se dañó durante el procesamiento. En la Tabla 5.42 se muestran las direcciones de las NRM de los especímenes de la muestra LG10.

Figura 5.12. Red estereográfica de NRM para LG10

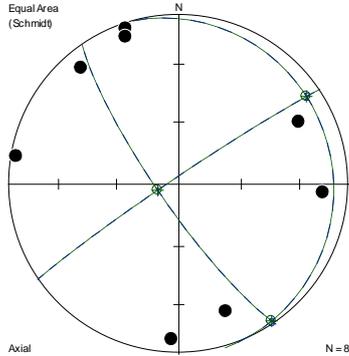
<b>Especímen</b>	<b>Declinación</b>	<b>Inclinación</b>
<b>A</b>	341	3
<b>B</b>	354	13
<b>C</b>	309	45
<b>D</b>	340	31
<b>E</b>	310	22
<b>F</b>	Desechada al dañarse durante el procesamiento	
<b>G</b>	24	6
<b>H</b>	204	56
<b>I</b>	22	57
<b>J</b>	251	40

Tabla 5.42. NRM de los especímenes de la muestra LG10.

Esta muestra presentaba mucha dispersión pero se decidió desmagnetizar a los especímenes A, B, D y G para ver lo que ocurría. A continuación se presenta la red estereográfica para cada especímen, su diagrama de Zijderveld y su gráfica de espectro de desmagnetización.

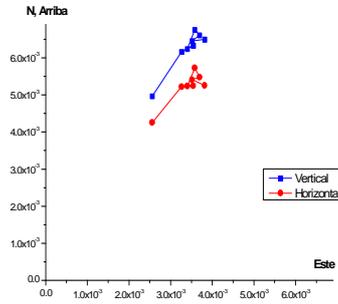
<sup>12</sup> Con corrección de Demarest (Demarest, 1983)

### Red Estereográfica



Dec = 344.4

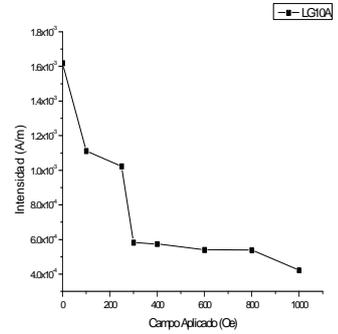
### LG10A Diagrama de Zijderveld



Plano principal

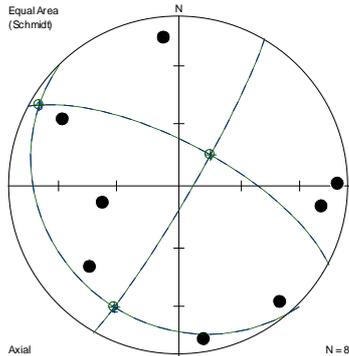
Tabla 5.43. LG10A

### Intensidad Vs Campo



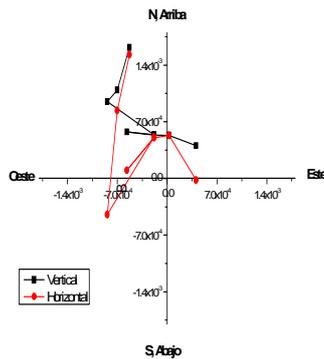
Inc = 10.5

### Red Estereográfica



Dec = 135.3

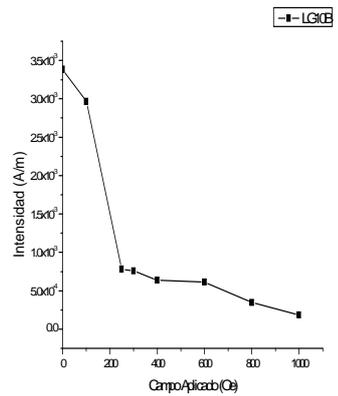
### LG10B Diagrama de Zijderveld



Plano Principal

Tabla 5.44. LG10B

### Intensidad Vs Campo

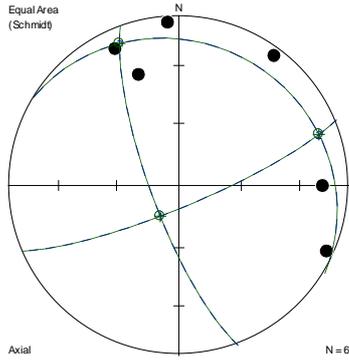


Inc = 21.2

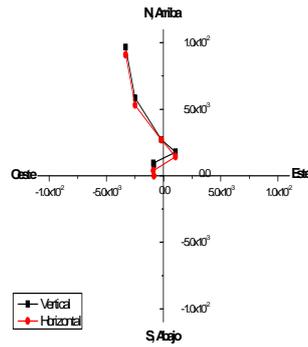
### Red Estereográfica

### LG10D Diagrama de Zijderveld

### Intensidad Vs Campo

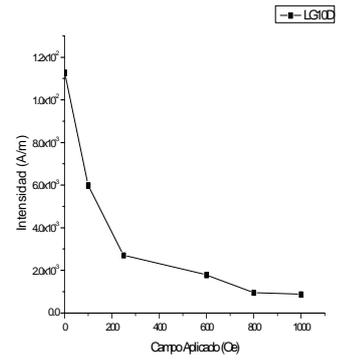


Dec = 337.3

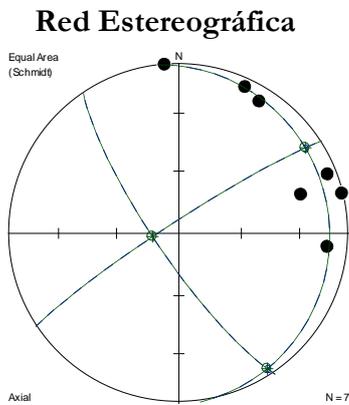


Plano principal

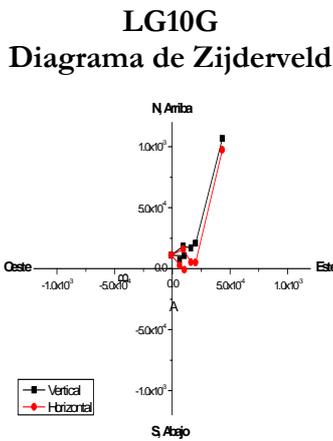
Tabla 5.45 LG10D



Inc = 10.3

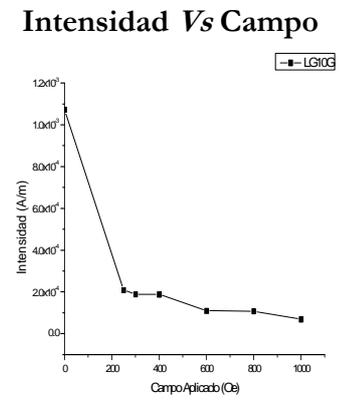


Dec = 353



Plano principal

Tabla 5.46 LG10G



Inc = 12.7

Todos los especímenes pilotos de esta muestra al ser desmagnetizados claramente se encontraron en un plano. Los especímenes A, D y G mostraron un diagrama de Zijderveld con tendencia hacia el origen y la intensidad también fue disminuyendo a medida que se aumentaba el campo.

El espécimen B muestra un diagrama de Zijderveld anómalo además de que la dirección de su plano principal difería de los otros pilotos. Por lo anterior, sólo se seleccionaron los especímenes A, D y G para ser analizados con estadística de Fisher utilizando el programa FISH2.BAS

La Tabla 5.47 muestra las direcciones promedio y MAD de los especímenes seleccionados.

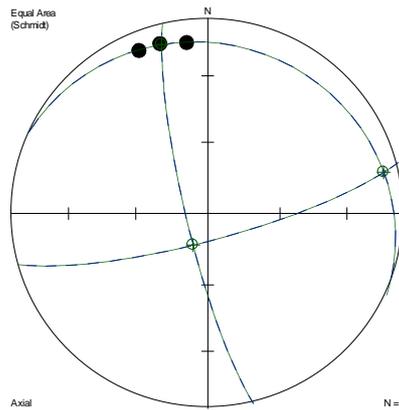


Figura 5.13. Red estereográfica correspondiente a los especímenes seleccionados de la muestra LG10.

Especímen	Declinación	Inclinación	MAD
<b>A</b>	344.4	10.5	17.91
<b>D</b>	337.3	10.3	19.93
<b>G</b>	353	12.7	12.18

Tabla 5.47. Resumen de los especímenes seleccionados de la muestra LG10 para entrar al análisis.

La dirección característica de la muestra LG04, así como los parámetros R, k y el intervalo de confianza  $\alpha_{95}$  se muestra en la siguiente tabla:

<b>N</b>	<b>Dec Promedio</b>	<b>Inc Promedio</b>	<b>R</b>	<b>k</b>	<b><math>\alpha_{95}</math></b>
3	344.9	11.2	2.98	107.51	8.95 <sup>13</sup>

Tabla 5.48 . Resultados de la muestra LG10. N es el número de especímenes, R es la resultante, k el parámetro de precisión y  $\alpha_{95}$  es el intervalo de confianza.

<sup>13</sup> Con corrección de Demarest (Demarest, 1983)

## 5.2 Fechamiento Arqueomagnético

Al tener las direcciones promedio de cada muestra éstas pueden compararse con curvas de variación secular que nos indican cómo ha variado el campo magnético terrestre a lo largo del tiempo.

Muestra	N	Dec Promedio	Inc Promedio	R	k	$\alpha_{95}$
LG01	6	345.8	21.3	5.84	31.96	9.38
LG02	6	352.0	55.5	5.95	109.57	5.00
LG03	5	3.6	41.5	4.94	63.13	7.61
LG04	6	343.2	23.2	5.96	132.83	4.55
LG05	4	350.8	33.2	3.94	49.22	10.05
LG10	3	344.9	11.2	2.98	107.51	8.95

Tabla 5.49. Direcciones promedio de las muestras del estudio. N es el número de especímenes, R es la resultante, k el parámetro de precisión y  $\alpha_{95}$  es el intervalo de confianza.

En la Tabla 5.49 podemos observar un intervalo de confianza ( $\alpha_{95}$ ) de no más de 10.05, valores altos del parámetro de precisión (k) y para cada muestra los valores de la resultante (R) tienden al número de especímenes en el análisis (N). Por lo anterior, podemos garantizar un estudio satisfactorio.

Conforme a los estudios Arqueológicos realizados en Los Grifos, las dos primeras capas de la unidad de excavación 1 (capa superficial o cero y capa II) constituirían ocupaciones del Clásico Tardío y Posclásico, la capa III un período transicional hacia períodos precerámicos y sólo la capa IV estaría asociada a niveles de transición entre el Pleistoceno y el Holoceno temprano (Acosta, 2009). Por lo anterior, las muestras LG01 y LG02<sup>14</sup> fueron analizadas con la curva de variación secular para Mesoamérica y para las muestras LG03-06 y LG10<sup>15</sup> se construyó una curva que nos diera una profundidad temporal mayor.

La curva de variación secular para Mesoamérica cuenta con datos de Wolfman (1990), todos ellos de sitios arqueológicos del área. Son muestras de estucos quemados y en solo algunos sitios desmagnetizados mediante campos alternos con el fin de observar que la única magnetización presente es la de exposición al fuego. En 1999 el grupo de arqueomagnetismo comenzó a trabajar para comprobar la hipótesis de que los pisos no expuestos al fuego también podían contar con una magnetización característica similar a la de una roca de tipo sedimentario. La hipótesis fue corroborada en la tesis de Hueda (2000) para el área de México central, ya que al estuco le era añadida tezontle y ceniza volcánica, ambos materiales con una gran cantidad de minerales magnéticos y a partir de allí se comenzó un trabajo exhaustivo que continúa, esta tesis es una parte del mismo<sup>16</sup>. El poder contar con fechamientos de estucos no quemados permite obtener la fecha de elaboración del mismo (Hueda *et al.*, 2004).

<sup>14</sup> Tomadas ambas en la unidad de excavación 1, capa II nivel 1

<sup>15</sup> LG03 tomada de la unidad de excavación 2 capa II, nivel 1, LG04 tomada de la unidad de excavación 2, capa IV nivel 2, LG05 tomada de la unidad 2, capa IV, niveles 3,4 y 5, LG10 tomada de la unidad 1, capa IV, nivel 6.

<sup>16</sup> Siendo la excepción ciertas zonas del área Maya, donde no hay rocas de tipo volcánico.

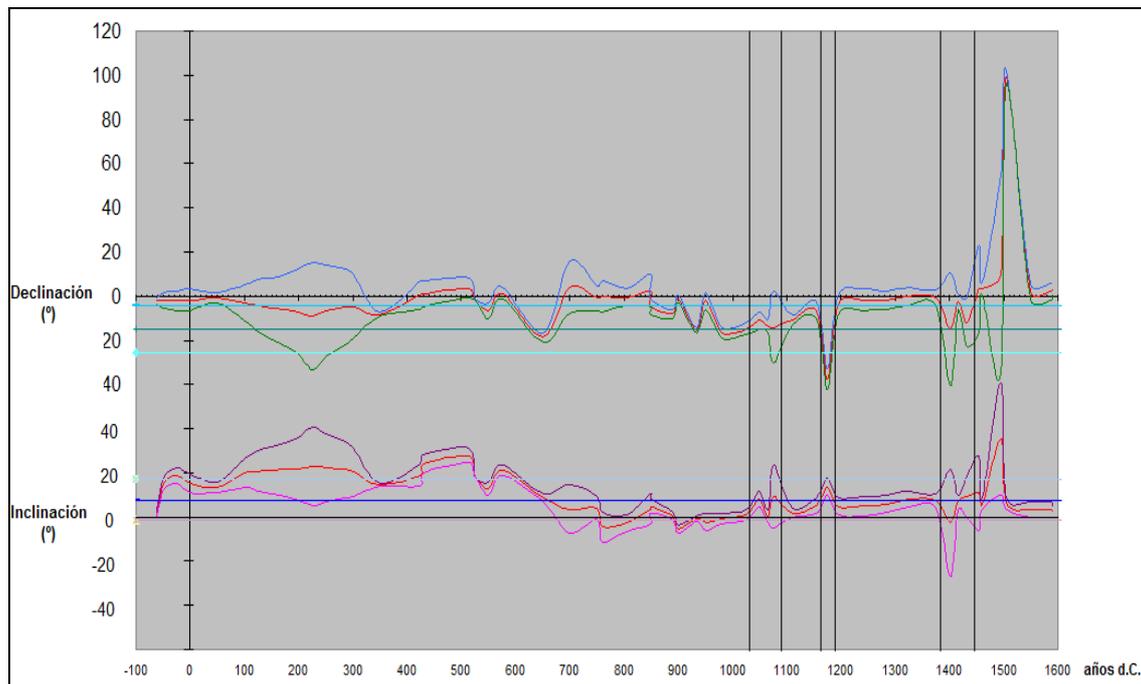
Además de los datos de Wolfman, para realizar los fechamientos de Hueda, se incorporaron a la curva datos de una estalagmita en San Luis Potosí (Latham *et al.*, 1989) y el dato de la erupción del Xitle (Urrutia-Fucugauchi, 1996).

Al momento se han incorporado más de 100 nuevos fechamientos de sitios como: Xalla y Templo Mayor (temporada de excavación 2001; Rodríguez, 2003), Tlatelolco y Xajay (Guerrero, 2003), Xalla y Teopancazco (temporada de excavación 2003; Sánchez, 2005), Teopancazco 1ª etapa de 2005 (Romero, 2008) y Chapultepec (temporada de excavación 2005-2006; López, 2008).

La curva se contruye mediante estadística Fisher con media móvil de una ventana de 100 años y con un valor medio cada 50 años, dependiendo de la cantidad de datos disponibles.

Para el período de 4,000 a 16,000 años a.p., se investigaron todos los datos paleomagnéticos para México de rocas volcánicas (Urrutia y Pozzo, 1993; Clement *et al.*, 1993; Gonzalez *et al.*, 1997; Vlag *et al.*, 2000; Conte-Fassano *et al.*, 2006; Michalk *et al.*, 2010) y los de un núcleo de sedimentos del lago de Chalco (Ortega, 1992).

Dado que la mayoría de los datos de variación secular son para el Centro de México se calcularon los polos geovirtuales (VGPs) de las direcciones características de cada muestra y se calculó la dirección de magnetización para el centro de México, de ésta manera se pudo efectuar la comparación.



Gráfica 5.1. Fechamiento de la muestra LG01 para el período 100 a.C a 1500 a.C.

En la Gráfica 5.1 se observan 3 intervalos de coincidencia para la muestra LG01:

- 1030 - 1090 años d.C
- 1160 - 1190 años d.C
- 1385 - 1445 años d.C

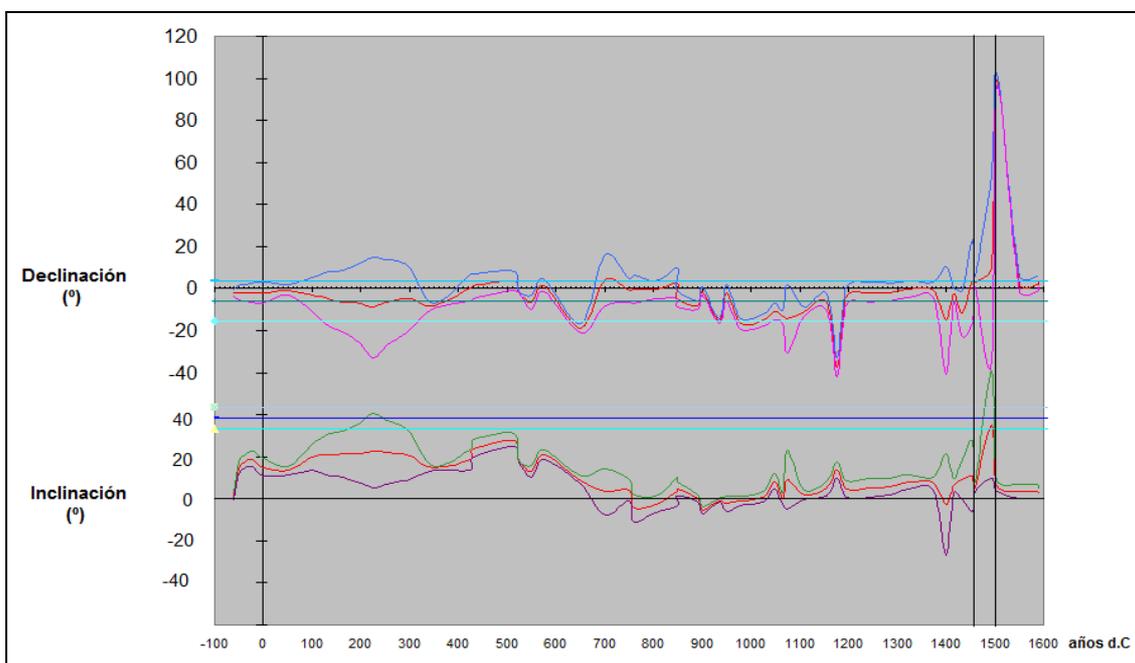
Por lo que tomando el valor medio de cada intervalo se obtienen las siguientes fechas:

1.  $1060 \pm 30$  años d.C
2.  $1175 \pm 15$  años d.C
3.  $1415 \pm 30$  años d.C

Las tres fechas corresponden al Posclásico<sup>17</sup>. Los estudios de <sup>14</sup>C que se realizaron a materia orgánica total del suelo de la capa II nivel 2 (un nivel estratigráfico inferior a LG01) dieron como resultado las siguientes fechas<sup>18</sup>:

- 1681 – 1737 años d.C. (0.286399)<sup>19</sup>
- 1757 – 1760 años d.C. (0.006259)
- 1803 – 1893 años d.C. (0.557179)
- 1904 – 1936 años d.C. (0.144388)
- 1950 – 1952 años d.C. (0.005775)

El mayor rango de confianza es para el intervalo 1803 – 1893 años d.C. y el que le sigue es 1681 – 1737 años d.C., fechamiento que coincide mejor con el número 3 que resultó con el método arqueomagnético. Estos fechamientos con <sup>14</sup>C son muy variables debido a la bioperturbación del suelo por la actividad ganadera en el lugar. Sin embargo, con lo que respecta a los materiales cerámicos en esta capa se acepta una ocupación entre el Clásico tardío y Posclásico por encima de los fechamientos con métodos radiométricos, resultado que coincide con el fechamiento arqueomagnético.



Gráfica 5.2. Fechamiento de la muestra LG02 para el período 100 a.C a 1500 a.C.

<sup>17</sup> Para fines de estudio se toma el período Posclásico del 900 al 1527 d.C.

<sup>18</sup> Clave LUR: UNAM-0928 .

<sup>19</sup> Rango de confianza del fechamiento

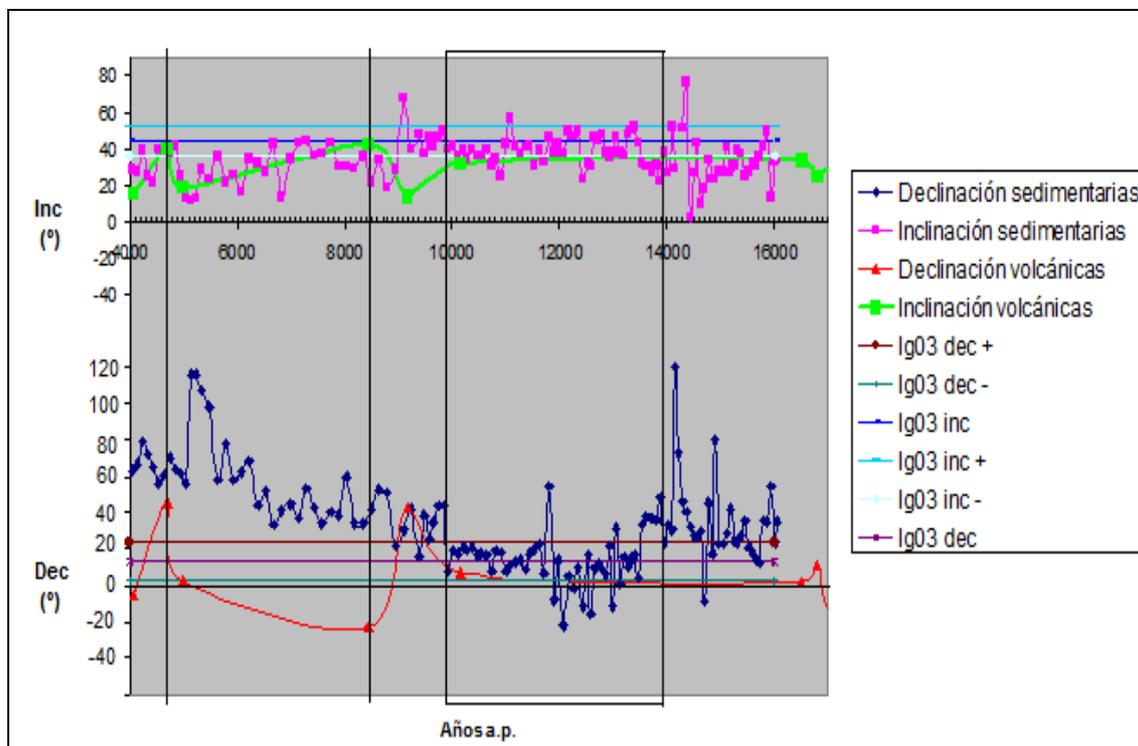
Para la muestra LG02 también se utilizó la curva de variación secular para Mesoamérica. En la Gráfica 5.2 se observa un intervalo de coincidencia entre la curva de variación secular y la dirección obtenida para la muestra LG02:

1460 - 1500 años d.C

Por lo que tomando el valor medio del intervalo se obtiene la siguiente fecha:

1480 ± 20 años d.C

Este fechamiento también corresponde al Posclásico conforme a los materiales cerámicos de la capa II. El fechamiento de  $^{14}\text{C}$  que le corresponde también a esta muestra es el mismo que para LG01. Al igual que se expuso anteriormente, los datos arrojados por el estudio de  $^{14}\text{C}$  deben tomarse con cautela debido a la bioperturbación por actividad ganadera en el sitio.

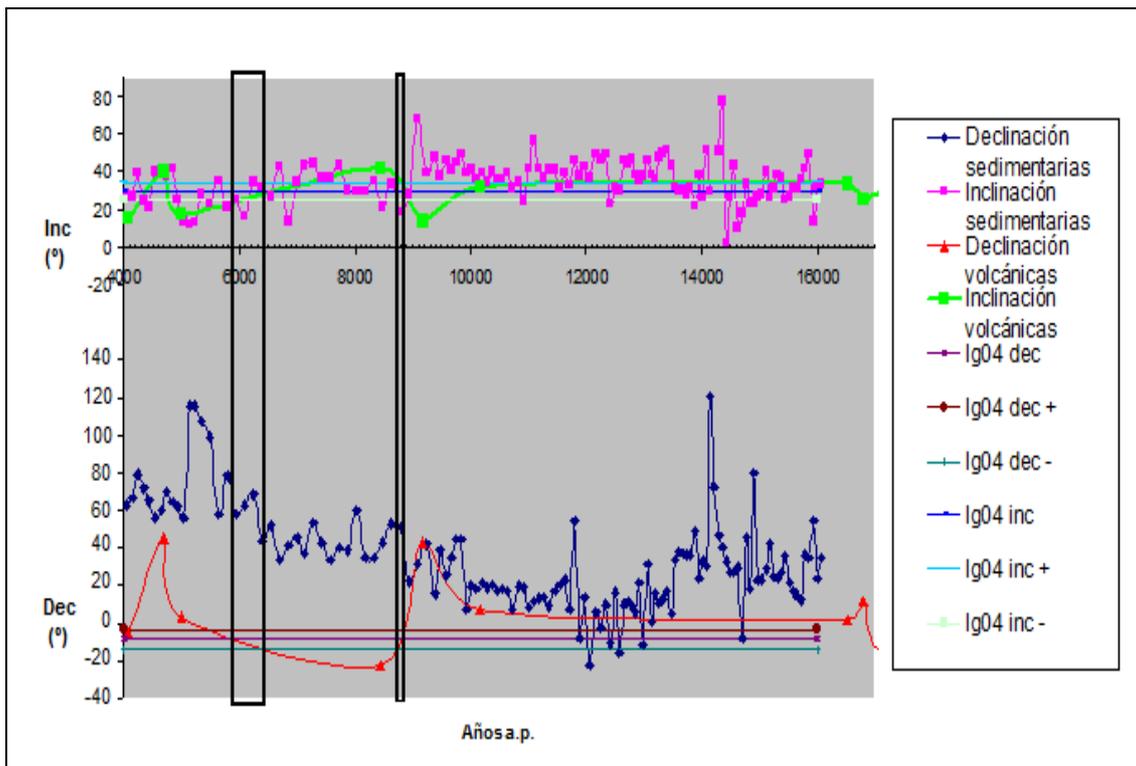


Gráfica 5.3. Fechamiento de la muestra LG03 para el período 4,000 – 16,000 años a.p.

Para efectuar el fechamiento en el caso de las rocas volcánicas y sedimentarias de 4,000 a 16,000 años a.p., se graficaron los datos de ambas (declinación e inclinación volcánicas y declinación e inclinación de sedimentarias). La declinación e inclinación media de la muestra estudiada y sus márgenes de error, también se graficaron mediante rectas para observar los puntos de intersección. Siempre se le da preferencia a los datos de rocas volcánicas, ya que los datos de las rocas sedimentarias por ser obtenidas de núcleos de perforación no son confiables en declinación. Pero obsérvese que en cuanto a forma de la curva si son muy parecidas y la mayor coincidencia se observa en las inclinaciones (Gráficas 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6)

Para la muestra LG03 se observa una inclinación muy alta pero al observar la curva de variación de inclinación con datos volcánicos se encuentran dos picos en la inclinación que corresponden con el rango de la muestra, aunque la declinación no lo haga (Gráfica 5.3). Los dos puntos que tienen una inclinación que coincide con los de la muestra son 4,700 y 8,435 años a.p. . Sin embargo, al no poder correlacionar la declinación con dichos puntos, no es posible hacer un fechamiento concluyente.

En el intervalo de 9,000 a 13,000 años a.p. también se observa coincidir la dirección de la muestra con las curva de variación secular con datos de sedimentos, sin embargo, tampoco es posible concluir nada ya que se necesitarían más datos de rocas volcánicas que para tal período no se tienen.



Gráfica 5.4. Fechamiento de la muestra LG04 para el período 4,000 – 16,000 años a.p

Para la muestra LG04 (Gráfica 5.4) se observan dos intervalos de coincidencia utilizando la curva de variación con datos de rocas volcánicas<sup>20</sup> para la inclinación y declinación:

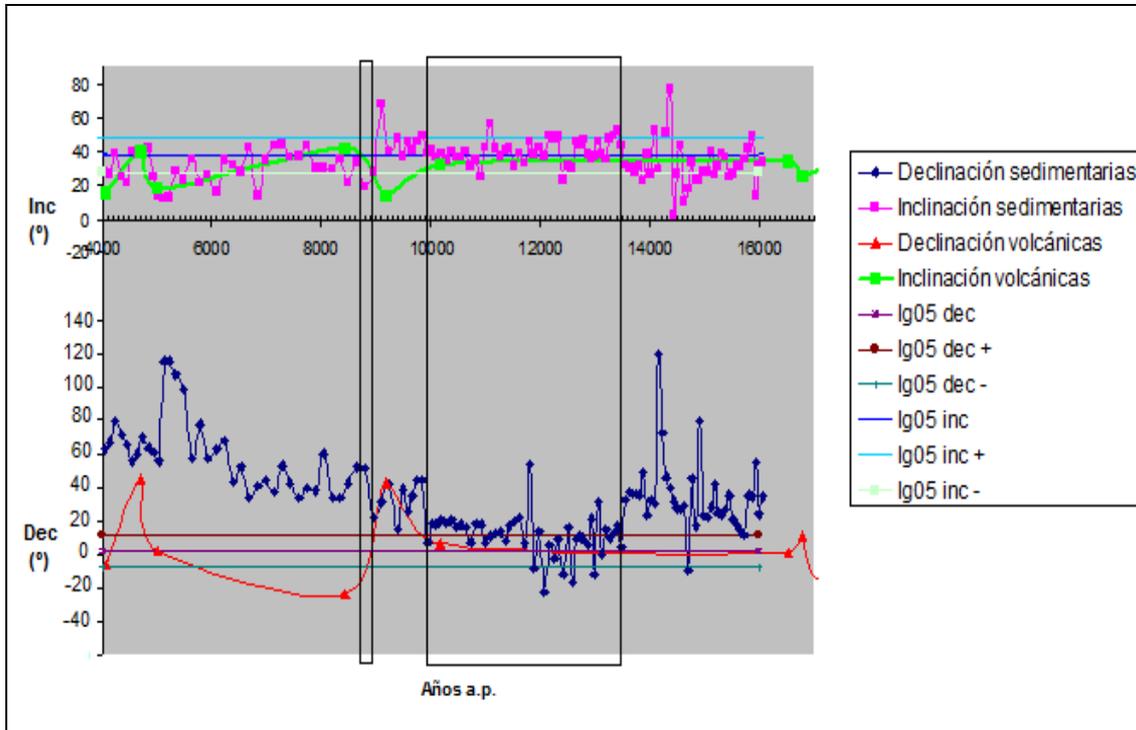
- 5,900 – 6,400 años a.p.
- 8,700 – 8,900 años a.p.

Por lo que tomando el valor medio de cada intervalo se obtienen las siguientes fechas:

- 6,150 ± 250 años a.p.
- 8,800 ± 100 años a.p.

<sup>20</sup> Para ambos intervalos, la variación en la inclinación con datos de rocas sedimentarias también coincide con las de la muestra.

El primer fechamiento tiene una mayor incertidumbre y corresponde al período de transición entre el pre-cerámico y el cerámico. Sin embargo, la segunda es la que mejor coincide con los fechamientos hechos con  $^{14}\text{C}$  por parte del INAH, que databan la época más temprana de los Grifos entre  $8930\pm 150$  y  $9540\pm 150$  años a.p (ver Figura 3.9).



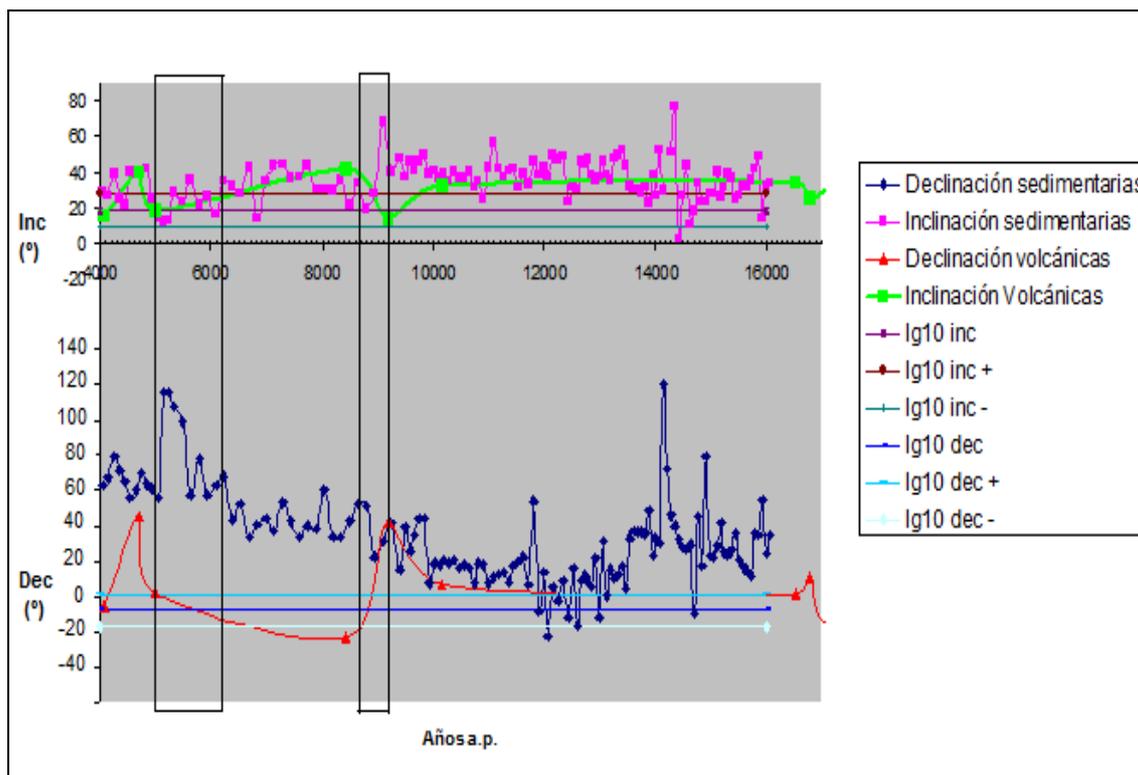
Gráfica 5.5. Fechamiento de la muestra LG05 para el período 4,000 – 16,000 años a.p

El intervalo de coincidencia de la inclinación y declinación de la muestra LG05 comparada con la curva de variación con datos de rocas volcánicas es 8,700 – 8,900 años a.p. (Gráfica 5.5). Tomando el valor medio del intervalo la fecha es:

$$8,800 \pm 100 \text{ años a.p.}$$

Se obtuvo el mismo fechamiento que para la muestra LG04 localizada en el mismo cuadro de la excavación y tan sólo un nivel estratigráfico por encima de la LG05. Al igual que LG04, la fecha obtenida coincide con el fechamiento de  $^{14}\text{C}$  por parte del INAH (entre  $8930\pm 150$  y  $9540\pm 150$  a.p).

En el intervalo de 9,900 a 13,400 años a.p. también se observa coincidir la dirección de la muestra con las curva de variación secular con datos de sedimentos, sin embargo, tampoco es posible concluir nada ya que se necesitarían más datos de rocas volcánicas que para tal período no se tienen.



Gráfica 5.6. Fechamiento de la muestra LG10 para el período 4,000 – 16,000 años a.p

Para la muestra LG10 (Gráfica 5.6) se observan dos intervalos de coincidencia utilizando la curva de variación con datos de rocas volcánicas<sup>21</sup> para la inclinación y la declinación:

5,000 – 6,200 años a.p.  
8,700 – 9,200 años a.p.

Por lo que tomando el valor medio de cada intervalo se obtienen las siguientes fechas:

$5,600 \pm 600$  años a.p.  
 $8,950 \pm 250$  años a.p.

La primera de ellas tiene una mayor incertidumbre y corresponde al período de transición entre el pre-cerámico y el cerámico. La segunda fecha coincide con el fechamiento de <sup>14</sup>C por parte del INAH (entre  $8930 \pm 150$  y  $9540 \pm 150$  a.p.).

<sup>21</sup> Para ambos intervalos, la variación en la inclinación con datos de rocas sedimentarias también coincide con las de la muestra.

Con base en el análisis individual de cada muestra, se resumen los resultados de este trabajo en la Tabla 5.50.

Muestra	N	<u>Dec</u>	<u>Inc</u>	R	k	$\alpha_{95}$	Fechas probables	Fecha aceptada
							1060 ± 30 años d.C	&
<b>LG01</b>	6	345.8	21.3	5.84	31.96	9.38	1175 ± 15 años d.C	&
							1415 ± 30 años d.C	&
<b>LG02</b>	6	352.0	55.5	5.95	109.57	5.00	1480 ± 20 años d.C	*
<b>LG03</b>	5	3.6	41.5	4.94	63.13	7.61	No se pudo hacer un fechamiento	
<b>LG04</b>	6	343.2	23.2	5.96	132.83	4.55	6,150 ± 250 años a.p.	
							8,800 ± 100 años a.p.	*
<b>LG05</b>	4	350.8	33.2	3.94	49.22	10.05	8,800 ± 100 años a.p.	*
<b>LG06</b>							Mucha dispersión	
<b>LG07</b>							Mucha dispersión	
<b>LG08</b>							Al desmagnetizar no fue posible observar una dirección característica de la muestra	
<b>LG09</b>							Al desmagnetizar no fue posible observar una dirección característica de la muestra	
<b>LG10</b>	3	344.9	11.2	2.98	107.51	8.95	5,600 ± 600 años a.p.	
							8,950 ± 250 años a.p.	*
<b>LG11</b>							Mucha dispersión	

Tabla 5.50 Resultados finales. &: En espera de otros estudios para su confirmación.

---

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

---

El Abrigo Rocosó de Los Grifos es uno de los pocos sitios excavados en México donde se han encontrado puntas acanaladas y su investigación ha permitido situar temporalmente éste tipo de tecnología en nuestro país en el Pleistoceno tardío y hasta inicios del Holoceno (8930 y 9540 años a.p.; Santamaría y García-Bárcena 1989). En este sitio se han encontrado una punta Clovis junto a dos fragmentos de Cola de Pescado, ambas consideradas como acanaladas pero con diferencias de tipo tecnológico que sugerirían un desarrollo independiente. De lo anterior se sigue el plantamiento del Ing. García-Bárcena que considera al Sureste mexicano como área de encuentro entre la tradición tecnológica Clovis de Norteamérica y la Cola de pescado de Sudamérica.

Con el estudio arqueomagnético del sitio Los Grifos fue posible obtener fechamientos para 5 muestras, de las 11 tomadas, corroborando las suposiciones tanto de la ocupación más tardía del Abrigo como de la más temprana.

La muestra LG03 a pesar de que sus especímenes mostraron un buen agrupamiento (Figura 5.7), los valores en inclinación fueron altos y por tanto, no fue posible encontrar un intervalo donde la dirección característica de la muestra coincidiera con la curva de variación secular. El único período en que la dirección de LG03 coincide con la curva construida con datos de sedimentos es de 9,000 a 13,000 años a.p. . Sin embargo como los datos de rocas volcánicas son más confiables, y no se cuentan con suficientes en dicho período, preferimos no efectuar el fechamiento.

En el caso de las muestras LG06, LG07 y LG11, las NRM de sus especímenes mostraron mucha dispersión en sus direcciones (Tabla A.1). Aunque la muestra LG06 se localizaba en el cuadro N4E6, justo en los alrededores del fogón del elemento A-B, no mostró una dirección característica. Sin embargo, la muestra LG10 de la cuál si pudimos obtener un fechamiento como detallaremos más adelante, fue tomada en parte del mismo cuadro de la muestra LG06 sólo que 2 niveles estratigráficos inferiores. Por lo anterior, pensamos que no se pudo observar una dirección característica de LG06 debido a una posible alteración por intemperismo.

Los problemas de dispersión que se tuvieron con las muestras LG07 y LG11, tomadas alrededor del fogón del elemento A-B, los atribuimos a que se tomaron como consolidados de ceniza y sedimento, utilizando pegamento blanco como agente adhesivo. Los pisos obtenidos fueron muy delgados, aún cuándo se utilizó suficiente cantidad pegamento y se esperó un tiempo considerable para que se consolidara. Creemos que fue por ésta razón que no fue posible al medir obtener una dirección característica para ambas muestras.

Las muestras LG08 y LG09 se obtuvieron de los cuadros N7E5 Y N7E6 de la unidad de excavación 3, abierta en 2009, aún cuándo no mostraban signos de haber sido expuestas al fuego me pareció que era importante estudiar las zonas más cercanas a la pared del abrigo. Los estereogramas de NRM para ambas muestras (Tabla A.5) mostraron mucha dispersión, sin embargo se desmagnetizaron algunos pilotos para observar su comportamiento. Observando las redes estereográficas de desmagnetización para cada espécimen piloto fue

imposible observar una dirección característica de la muestra. Pensamos que fue debido a una poca o nula exposición al fuego por lo que los momentos magnéticos del material no tomaron la orientación del campo y por tanto no fue posible hacer un fechamiento.

Las muestras de las cuáles si fue posible obtener su fechamiento fueron LG01, LG02, LG03, LG04, LG05 y LG10. Conforme a lo previsto por los estudios de cerámica, fue posible fechar las dos muestras (LG01 y LG02) tomadas de niveles estratigráficos superiores en el Posclásico. La muestra LG01 arrojó 3 fechas:  $1060 \pm 30$  años d.C.,  $1175 \pm 15$  años d.C.,  $1415 \pm 30$  años d.C., todas ellas en el Posclásico. La última fecha es la que mejor coincide con el fechamiento por  $^{14}\text{C}$  del material tomado un nivel estratigráfico inferior, sin embargo el porcentaje de error es del 17.21%. El fechamiento por  $^{14}\text{C}$  debe ser tomado con cautela debido a la bioperturbación del suelo causada por la actividad ganadera, ya que el sitio ha sido utilizado como corral en épocas de lluvias. Se esperan nuevos estudios para

La muestra LG02 nos dio una fecha de  $1480 \pm 20$  años d.C., lo cuál aún es Posclásico y por lo tanto la consideramos satisfactoria.

Para las muestras tomadas en estratos inferiores, los fechamientos obtenidos también coinciden con lo esperado para las ocupaciones tempranas<sup>1</sup>, esto es, durante el Holoceno temprano.

Las muestras LG04 y LG05 fueron tomadas de roca madre alrededor del fogón del elemento A-B en el cuadro N3E7 Capa IV, Nivel 2 y Nivel 3, 4 y 5, respectivamente, en la unidad de excavación 2. Esta unidad de excavación corresponde a la parte de la retícula del PCTA que se empataba con la retícula de las excavaciones por parte del INAH en los setentas. En este estudio para las muestras LG04 y LG05 se obtuvieron fechas de  $8,800 \pm 100$  años a.p., similares a los estudios de radiocarbono de la excavación del INAH que arrojó fechas entre  $8930 \pm 150$  y  $9540 \pm 150$  años a.p. (ver Figura 3.9) para la época más temprana de Los Grifos. Se está en espera de los estudios de radiocarbono del PCTA para corroborar nuestros fechamientos, pero todo indica que son aceptados.

La muestra LG10, tomada de los cuadros N3E6 y N4E6<sup>2</sup> Capa IV Nivel 6 nos dio dos fechamientos, uno siendo  $5,600 \pm 600$  años a.p. en el límite entre las ocupaciones precerámicas y cerámicas y otro  $8,950 \pm 250$  años a.p. que corresponde a la transición Pleistoceno-Holoceno. La fecha que se eligió fue la de  $8,950 \pm 250$  años a.p. ya que corresponde mejor a lo esperado para dicho nivel estratigráfico del sitio y tiene una incertidumbre menor.

La diferencia de incertidumbres en los fechamientos se deben a que usamos dos curvas de variación secular diferentes; la curva de variación secular para Mesoamérica desde el año 1 a 1,600 d.C. y una curva que construimos con los datos disponibles de rocas volcánicas entre el 4,000 a 16,000 años a.p. La curva de Mesoamérica cuenta con un mayor número de datos<sup>3</sup>, ya que fue resultado del trabajo doctoral de Wolfman (1990) y del trabajo ininterrumpido del grupo de arqueomagnetismo de la UNAM desde el año 2000. Por el contrario, la curva entre 4,000 y 16,000 años a.p. son únicamente 11 datos, esto es del orden de 1 cada mil años, por eso empleamos como guía también los datos del trabajo doctoral de Ortega (1992), que provienen de sedimentos lacustres.

---

<sup>1</sup> Tanto por los estudios de Santamaría y García-Bárcena como para el PCTA.

<sup>2</sup> Mismo cuadro de la muestra LG06 de la cuál no fue posible obtener fechamiento.

<sup>3</sup> Del orden de una dirección promedio por cada 100 años

Observamos que los resultados positivos corresponden al 45% de las muestras en el estudio, lo que es un resultado normal para los datos arqueomagnéticos. Cada una de las muestras arqueomagnéticas es única ya que depende de su composición química y su formación. En este caso en particular depende del grado de exposición al fuego, como también de la cantidad de minerales magnéticos presentes en el piso.

Se aprecia en general las muestras más cercanas al fogón mostraron un mejor agrupamiento en sus direcciones características, lo que se explica debido a que lograron un mejor ordenamiento de los espines magnéticos de sus átomos con el campo presente al momento de enfriarse. También observamos una correcta secuencia estratigráfica, los pisos más profundos presentando edades mayores que los más someros.

Los resultados de este estudio muestran como el método arqueomagnético presenta una mayor precisión que el de  $^{14}\text{C}$ , cuando se cuenta con un número suficiente de datos en la curva de Variación Secular.

Este trabajo denota la importancia de contar con un mayor número de estudios arqueomagnéticos para el período entre 2,000 y 20,000 años a.p., así como la continuación con las investigaciones de las ocupaciones tempranas en nuestro país, en particular en la región del Sureste Mexicano. Al complementarse este trabajo con los resultados que a futuro se contarán de  $^{14}\text{C}$ , serán una importante contribución para un real mejoramiento de la curva de Variación Secular para el poblamiento temprano de América.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

Acosta, Guillermo

- 2004 *Proyecto Cazadores del Trópico Americano, proyecto general y propuesta para la primera temporada de campo*, Proyecto que se emite al Consejo de Arqueología del Instituto de Investigaciones Antropológicas para su aprobación, México D.F., México pp. 3-7 . j
- 2005 “Sobre la llamada Prehistoria en México: Una evaluación del estado de conocimiento de las sociedades de cazadores recolectores en nuestro país”, en *Actualidades Arqueológicas*, núm 2, pp. 26-31
- 2006 *Segunda Temporada de Campo: Excavaciones en dos Cuevas Secas de la región de Ocozocoautla, Chiapas*, Informe que se emite al Consejo de Arqueología del Instituto de Investigaciones Antropológicas para su evaluación, México D.F., México.
- 2007 *Cazar y recolectar en la selva: Cotidianidad y paisaje en los cazadores-recolectores del Holoceno Temprano en Chiapas, México*. Ponencia presentada en el VII Coloquio Pedro Bosch Gimpera, Instituto de Investigaciones Antropológicas UNAM, México D.F.
- 2006 *La Cueva de Santa Marta y los primeros pobladores de las regiones tropicales de México*, Ponencia que se presentó en el “III Simposio Internacional El Hombre Temprano en América”, en la Ciudad de Saltillo, Coahuila, del 23 al 28 de octubre de 2006.
- 2008 *La Cueva de Santa Marta y los cazadores-recolectores del Pleistoceno final–Holoceno temprano en las regiones tropicales de México*, Tesis de Doctorado, UNAM, México, D.F., México, vol. 1.
- 2009 *Temporada 2008-2009: Excavaciones en el Abrigo Los Grifos, Chiapas*, Informe técnico preliminar que se emite al Consejo de Arqueología del Instituto de Investigaciones Antropológicas para su evaluación, México D.F., México.

Acosta, Joseph de

- 1962 *Historia natural y moral de las Indias*, México D.F., México, Fondo de Cultura Económica, pp. 54-58

Bate, Luis Felipe

- 1990 “Culturas y modos de vida de los cazadores recolectores en el poblamiento de América del Sur”. *Revista de Arqueología Americana*, núm. 2, pp. 89-153.

Bate, Luis Felipe y Alejandro Terrazas

- 2006 “Apuntes sobre las investigaciones prehistóricas en México y América latina”, en Jiménez, José, Silvia Gonzalez, Joé Pompa y Francisco Ortiz (coords.) *El hombre temprano en América y sus implicaciones en el poblamiento de la cuenca de México, Primer Simposio Internacional*, México D.F., México, INAH.

- Bryan, Alan L.  
 1999 “The Original Peopling of Latin America”,  
[http://www.unesco.org/culture/latinamerica/html\\_eng/chapter.htm](http://www.unesco.org/culture/latinamerica/html_eng/chapter.htm),  
 consultado el 27 de Marzo de 2010.
- Bryan, Alan L. y Ruth Gruhn  
 1989 “The evolutionary significance of the American Lower Paleolithic”, en  
 Mirambell, Lorena (coord.) Homenaje a José Luis Lorenzo, México D.F.,  
 México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, pp. 81-97.  
 1992 “La discusión sobre el poblamiento pleistocénico de América del Sur”, *Revista  
 de Arqueología Americana*, núm. 5, pp. 232-261.
- Böhnel, Harald y Roberto Molina-Garza  
 2002 “Secular variation in Mexico during the last 40,000 years”, en *Physics of the Earth  
 and Planetary interiors*, v. 133, p. 99-109
- Butler, R..  
 2002 *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic terranes*, Tucson, EUA.
- Buschow, K.H.J. y F.R. de Boer  
 2003 *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*, New York, EUA, Kluwer Academic  
 Publishers.
- Clement B.M, C.B. Connor y G. Graper  
 1993 “Paleomagnetic estimate of the emplacement temperature of the long-runout  
 Nevado de Colima volcanic debris avalanche deposit, Mexico”, en *Earth and  
 Planetary Science Letters*, v.120, pp.499-510
- Conte-Fassano, G., J. Urrutia-Fucugauchi, A. Goguitchaichvili y J. Morales Contreras  
 2006 “Low-latitude paleosecular variation and the time-averaged field during the late  
 Pliocene and Quaternary – Paleomagnetic study of the Michoacan-Guanajuato  
 volcan field, Central Mexico, en *Earth, Planets Space*, v.58, pp.1359-1371
- Demarest, H.  
 1983 “Error Analysis for the determination of tectonic rotation from paleomagnetic  
 data” en *Journal of Geophysical Research*, v.88 pp.4321-4328.
- Dunlop, David J. y Özden Özdemir  
 1997 *Rock Magnetism*, Cambridge, Gran Bretaña, Cambridge University Press.
- Eighmy, Jeffrey L.  
 1990 “Archeomagnetic Dating: Practical Problems for the Archeologist” en Eighmy,  
 Jeffrey L. y Robert S. Sternberg (eds.), *Archeomagnetic Dating*, Tucson, EUA, The  
 University of Arizona Press, p. 35-
- Fiedel, Stuart J.  
 1996 *Prehistoria de América*, 2da edición, trad. Marcela Ríos, Barcelona, España,  
 Grijalbo Mondadori . pp.30-40 y cap 2-4.

Fisher, R.A.

1953 "Dispersion on a sphere", en *Proceedings of the Royal Society*, v.A.217, pp. 295-305

García-Bárcena, Joaquín

1982 "La etapa lítica del Sureste de México" en Actas, X Congreso de la Unión Internacional de Ciencias Prehistóricas y Protohistóricas, México D.F., México, pp. 400-422

1993 "Los pueblos cazadores y recolectores" en Arenzana, Ana, *El poblamiento de México; Una visión histórico demográfica*, tomo I, México D.F., México, pp. 117-137.

2001a "Introducción al tema y cuadro de la Etapa Lítica con sus fases", en *Arqueología Mexicana*, México D.F., volumen IX, núm 52, pp. 28-29.

2001b "Tecnología lítica", en *Arqueología Mexicana*, México D.F., volumen IX, núm 52, pp. 42-45.

Glaßmeier, Karl-Heinz, Heinrich Soffel y Jorg Negendank (Eds.)

2009 *Geomagnetic Field Variations*, Berlín, Springer, 214 p.

Gonzalez, Silvia, Graham Sherwood, Harald Böhnell y Elisabeth Schnepf

1997 "Paleosecular variation in Central Mexico over the last 30,000 years: the record from lavas" en *Geophysical Journal International*, v. 130, n.1, pp. 201-219.

Guerrero, X.

2003 Análisis arqueomagnético de estucos del Valle de México, Tesis de licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F., México.

Hueda, Y.

2000 *Fechaamiento arqueomagnético de estuco de los sitios de Teopancazco, Teotihuacán y Templo Mayor, Tenochtitlan*. Tesis de licenciatura en Arqueología, ENAH, México D.F. México.

Hueda, Y., A.M. Soler-Arechalde, J. Urrutia-Fucugauchi, L. Barba, L. Manzanilla, M. Rebolledo-Vieyra y A. Goguitchaichvili

2004 "Arqueomagnetic studies in central Mexico – Dating of Mesoamerican lime-plasters", en *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 147, pp. 269-283.

Irving, E.

1964 *Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems*, Nueva York, EUA, John Wiley & Sons, Inc. Cap. 2.

Jacobs, J.A.

1994 *Reversals of the earth's magnetic field*, Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, p. 4 .

Jonkers, A.R.T., Andrew Jackson y Anne Murray

2003 "Four Centuries of Geomagnetic Data from Historical Records", en *Reviews of Geophysics*, v. 41.

Lanza, Roberto y Antonio Meloni

2006 *Earth's magnetism: an Introduction for Geologists*, Berlin, Alemania, Springer.

- Latham, A.G., D.C. Ford, H.P. Schwarz y T. Birchall  
 1989 “Secular variation from Mexican stalagmites: their potential problems”, en *Physics of the Earth and planetary Interiors*, v.56, pp. 34-48.
- Love, Jeffrey J.  
 2006 “Fisher Statistics”, en Gubbins, David y Emilio Herrero-Bervera [Editores], *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Dordrecht, Holanda, Springer, pp. 272-273.
- Lynch, Thomas F.  
 1992 “La realidad del concepto paleoindio en contra de las protestas de Macneish, Bryan y Gruhn”, *Revista de Arqueología Americana*, núm. 5, pp. 249-260.
- López, Verónica  
 2008 *Fechamientos Arqueomagnéticos en Chapultepec. Evidencia de presencia Teotihuacana*, Tesis de licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F., México.
- Martin, Paul S.  
 1967 “Prehistoric overkill”, en Martin, P. S. y H.E Wright [Editores], *Pleistocene Extinctions: The search for a cause*, Yale University Press, New Haven, pp. 75-120.
- Martínez, Pablo  
 1952 *Los orígenes americanos*, México, D.F., México, Páginas del siglo XX, Cap 1.
- Merrill, Ronald T., Michael W. McElhinny y Phillip L. McFadden  
 1996 *The magnetic field of the earth: paleomagnetism, the core, and the deep mantle*, San Diego, EUA, Academic Press, Inc., Caps 1-3.
- Michalk, D.M., A. Muxworthy, H. Bönhel, J. Maclennan y N. Nowaczyk  
 2010 “Evaluation of the multispecimen parallel differential pTRM method: a test on historical lavas from Iceland and Mexico”, en *Geophysical Journal International*, v.173, pp.409-420.
- McElhinny, Michael W.  
 1973 *Paleomagnetism and Plate Tectonics*, Londres, Gran Bretaña, Cambridge University Press.
- Mirambell, Lorena  
 2001 “Arqueolítico y Cenolítico inferior (30,000-7,000 a.C)”, en *Arqueología Mexicana*, México D.F., volumen IX, núm 52, pp. 28-29.
- Ortega, Beatriz  
 1992 *Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del cuaternario tardío en el lago de Chalco, Cuenca de México*, Tesis de Doctorado.
- Porkony, Jiri.  
 2007 “Spinner Magnetometer”, en Gubbins, David y Emilio Herrero-Bervera (eds.), *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Dordrecht, Holanda, Springer, p. 920-921.

Purcell, Edward M.

- 1985 *Electricity and Magnetism: Berkeley Physics Course Volume 2*, 2da edición, EUA, McGraw Hill Inc., cap. 11.

Rodríguez, M.G.

- 2003 *Análisis y fechamiento arqueomagnético en zonas habitacionales de Teotihuacán (Xalla) y Templo Mayor*, Tesis de licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F., México.

Sánchez, F.

- 2005 *Nuevos fechamientos arqueomagnéticos de Xalla y Topancazco, zonas habitacionales de Teotihuacan*, Tesis de licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F., México.

Santamaría, Diana y Joaquín García-Bárcena

- 1982 *La cueva de Santa Marta, Ocozocoautla, Chiapas. Estratigrafía, cronología y cerámica*, México D.F., México, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

- 1989 *Puntas de proyectil, cuchillos y otras herramientas sencillas de Los Grifos*, Instituto nacional de Antropología e Historia, México.

Service, Elman R.

- 1984 *Los cazadores*, 3ra. Ed., Barcelona, España, Editorial Labor.

Soler, Ana María

- 2006 *Investigaciones Arqueomagnéticas en México; Fundamentos, Historia y Futuro*, Monografías del Instituto de Geofísica, UNAM, n. 10, México, D.F., México.

Sternberg, Robert S.

- 1990 "The Geophysical Basis of Archeomagnetic Dating", en Eighmy, Jeffrey L. y Robert S. Sternberg (eds.), *Archeomagnetic Dating*, Tucson, EUA, The University of Arizona Press, pp. 5-28.

Sternberg, Robert S. y R.H. Mcguire

- 1990 "Techniques for Constructing Secular Variation Curves and for Interpreting Archeomagnetic Dates", en Eighmy, Jeffrey L. y Robert S. Sternberg [Editores], *Archeomagnetic Dating*, Tucson, EUA, The University of Arizona Press, pp.109-134.

Tauxe, Lisa

- 2005 *Lectures in Paleomagnetism*, La Jolla, EUA, <http://erda.sdsc.edu/website/MAGIC/books/Tauxe/2005/>, Caps. 1-5.

Tarling, Donald

- 1983 *Paleomagnetism. Principles, applications y geology, physics and archeology*, Londres, UK, Chapman and Hall

- 1987 "Archeomagnetism", en Gubbins, David y Emilio Herrero-Bervera [Editores], *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Dordrecht, Holanda, Springer, pp. 31-32

Urrutia-Fucugauchi, J.

- 1996 "Paleomagnetic study of the Xitle-Pedregal de San Angel lava flow, southern Basin of Mexico, en *Physics of the Earth and planetary Interiors*, v.97, pp. 177-196
- Urrutia-Fucugauchi, J. y A. Martin del Pozzo
- 1993 "Implicaciones de los datos paleomagnéticos sobre la edad de la Sierra de Chichinautzin, cuenca de México", en *Geofísica Internacional*, v. 32, p. 523-533.
- Vlag, P., L. Alva-Valdivia, C.B. de Boer, S. Gonzalez, J. Urrutia-Fucugauchi
- 2000 A rock- and paleomagnetic study of a Holocene lava flow in Central Mexico, en *Physics of the Earth and planetary Interiors*, v.118, pp. 259-272.
- Wolfman, D.
- 1990 "Mesoamerican chronology and archeomagnetic dating, AD 1 – 2000, en Eighmy, Jeffrey L. y Robert S. Sternberg [Editores], *Archeomagnetic Dating*, Tucson, EUA, The University of Arizona Press, pp.261-391.

## APÉNDICE

### A.1 Muestras no incluidas

En esta sección se presentan las gráficas de las muestras que no utilizamos en el estudio.

#### A.1.1 Muestras no incluidas por su estereograma

Las muestras LG06 y LG07 fueron desechadas al observar su red estereográfica de NRM.

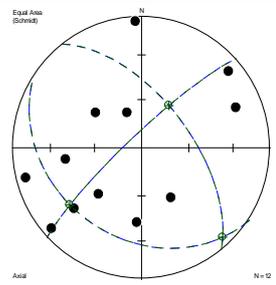
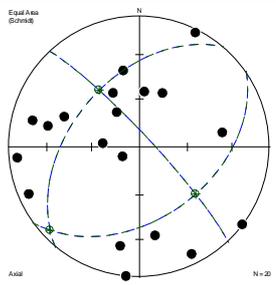
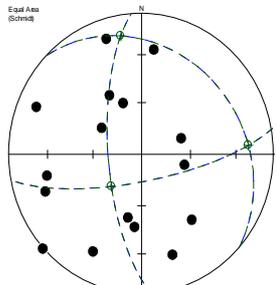
LG06	Observaciones	LG07	Observaciones
	No se pudo determinar una dirección de la muestra. La mayoría de los especímenes presentaron intensidades negativas.		Mucha dispersión. No se pudo determinar una dirección de la muestra.
LG11	Observaciones		
	Mucha dispersión. No se pudo determinar una dirección de la muestra.		

Tabla A.1. Redes estereográficas de las muestras LG06, LG07 y LG11

Especímen	Declinación	Inclinación
A	247	-22
B	76	-8
C	82	-40
D	224	50
E	229	31
F	229	-12
G	229	8
H	157	-66
I	4	-43
J	329	-54
K	177	-4
L	307	53

Tabla A.2. Valores de NRM para la muestra LG06

<b>Especímen</b>	<b>Declinación</b>	<b>Inclinación</b>
AA	5	55
AB	185	-55
AC	61	-78
AD	307	-2
AE	170	32
AF	104	-17
BA	11	-24
BB	186	1
BC	348	40
BD	154	-52
BE	283	29
BF	85	-7
CA	96	-67
CB	334	-10
CC	292	38
CD	80	36
CE	23	53
CF	26	3
CG	247	9
CH	147	-64

Tabla A.3. Valores de NRM para la muestra LG07

<b>Especímen</b>	<b>Declinación</b>	<b>Inclinación</b>
AA	321	-40
AB	162	-15
AC	339	58
AD	228	0
AE	162	26
AF	113	-15
AG	69	64
AH	7	26
AI	103	63
BA	28	-23
BB	78	-28
BD	70	-24
BE	302	61
BF	6	-47
BG	193	52
BH	330	50

Tabla A.4. Valores de NRM para la muestra LG11

## A.1.2 Muestras no incluidas al observar el comportamiento de las desmagnetizaciones

Las muestras LG08 y LG09 fueron desechadas al observar la red estereográfica de las desmagnetizaciones de sus especímenes pilotos así como sus diagramas de Zijderveld. No fue posible determinar una dirección para las muestras.

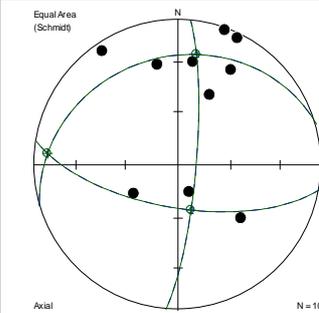
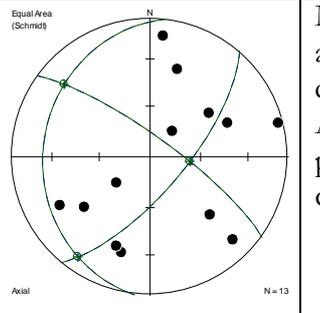
LG08	Observaciones	LG09	Observaciones
 <p>Equal Area (Schmidt) Axial N = 10</p>	E, F y J alejadas por lo que se descartaron del estudio. Se desmagnetizaron B, C, D, H e I.	 <p>Equal Area (Schmidt) Axial N = 13</p>	Mucha dispersión, aún así se desmagnetizaron A, E, G, I, y K para ver cómo se comportaban.

Tabla A.5. Redes estereográficas de las muestras LG08 y LG09

Especímen	Declinación	Inclinación
A	29	26
B	8	29
C	25	4
D	24	46
E	338	-74
F	258	-60
G	19	2
H	348	30
I	326	6
J	310	-43

Tabla A.6. Valores corregidos de NRM para la muestra LG08

Los especímenes que se seleccionaron para ser desmagnetizados fueron B, C, D, H e I. A continuación se presenta la red estereográfica para cada espécimen piloto, su diagrama de Zijderveld y su espectro de desmagnetización.

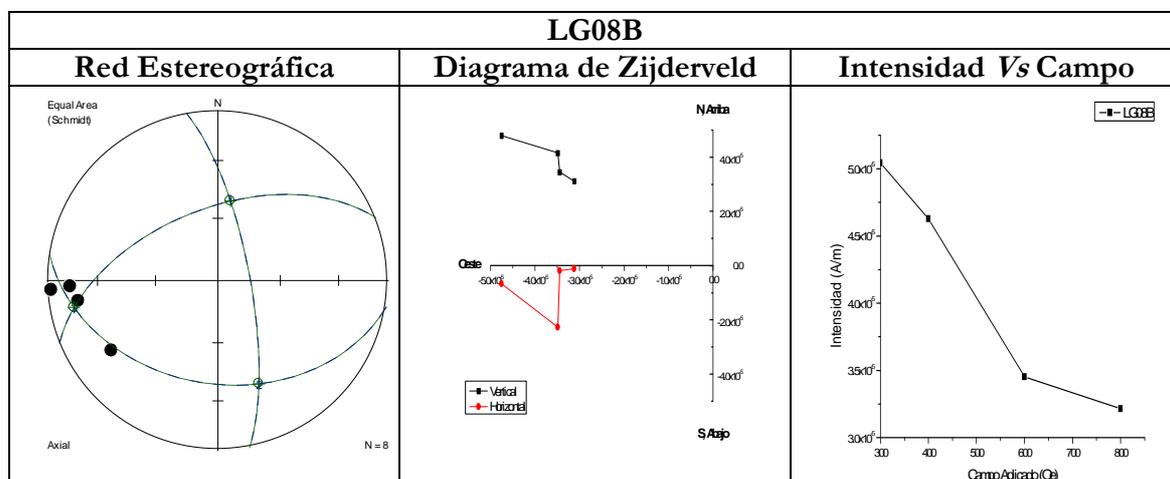


Tabla A.7 LG08B

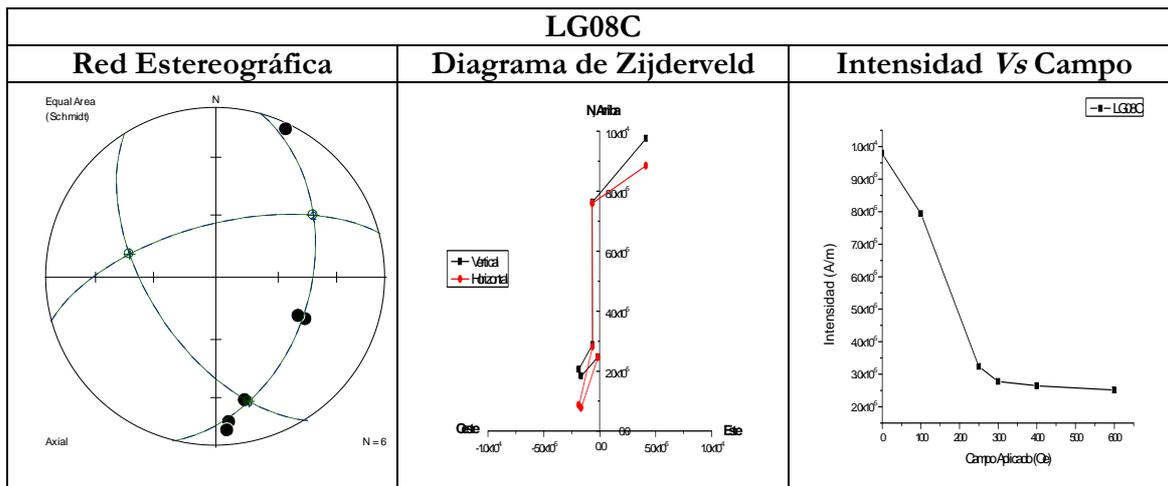


Tabla A.8 LG08C

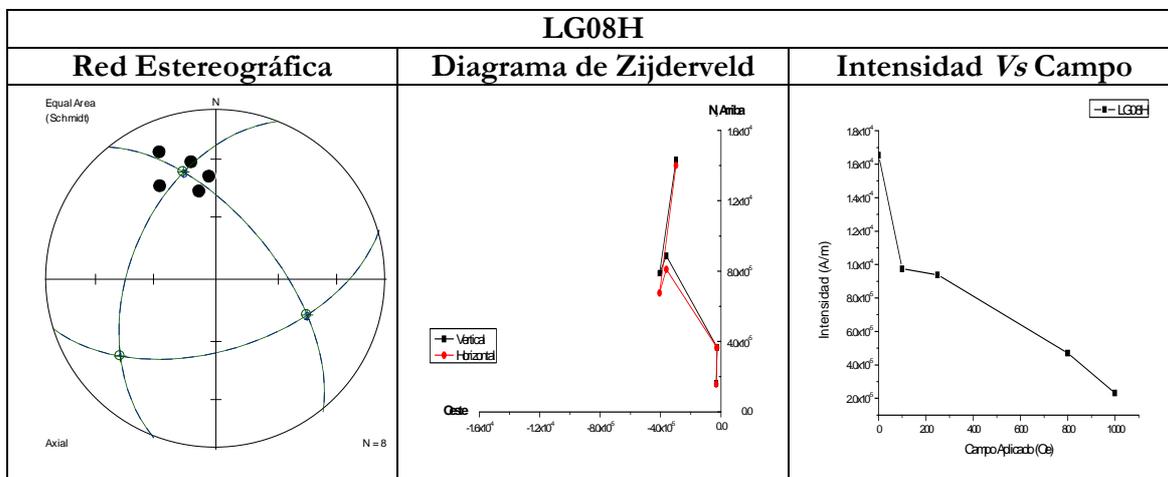


Tabla A.9 LG08H

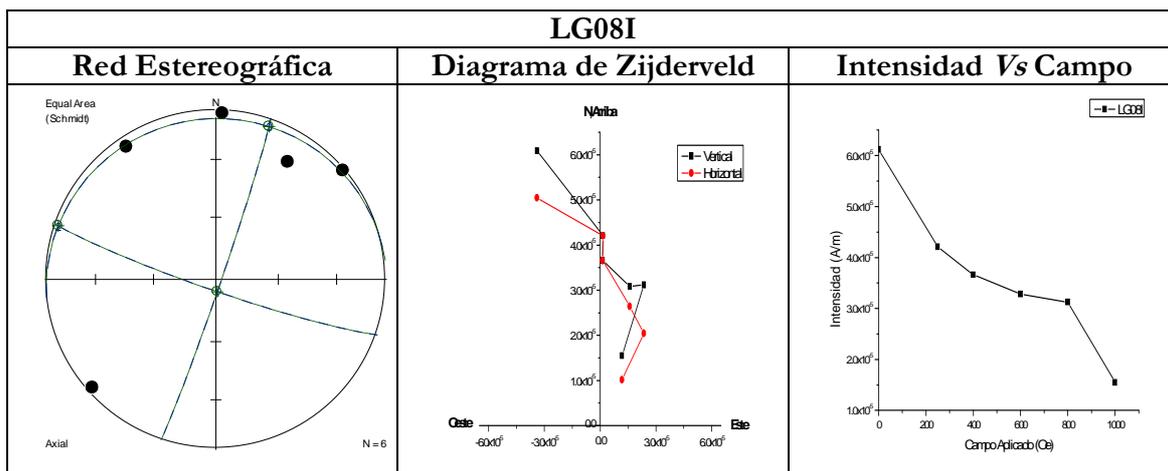


Tabla A.10 LG08I

Al observar la red estereográfica de cada piloto desmagnetizado no se pudo determinar una dirección de la muestra.

En la tabla siguiente se muestran las direcciones para la muestra LG09.

Especímen	Declinación	Inclinación
A	66	39
B	53	46
C	255	-5
D	17	-29
E	40	70
F	53	-65
G	6	13
H	201	32
I	17	34
J	233	40
K	134	40
L	242	27
M	315	-17

Tabla A.11 Valores de NRM para la muestra LG09

Los especímenes que se seleccionaron para ser desmagnetizados fueron A, E, G, I y K. A continuación se presenta la red estereográfica para cada especímen, su diagrama de Zijderveld y su espectro de desmagnetización.

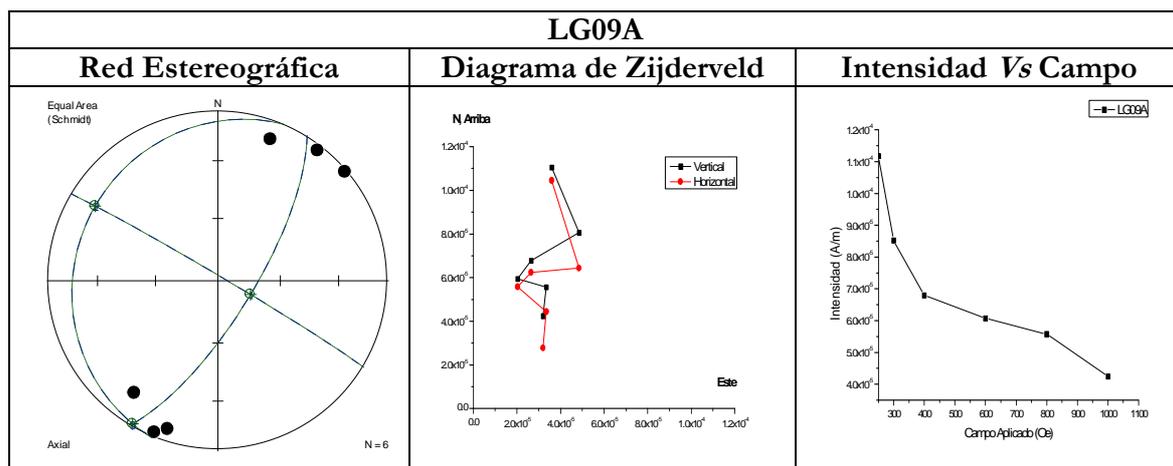


Tabla A.12 LG09A

LG09E		
Red Estereográfica	Diagrama de Zijderveld	Intensidad Vs Campo

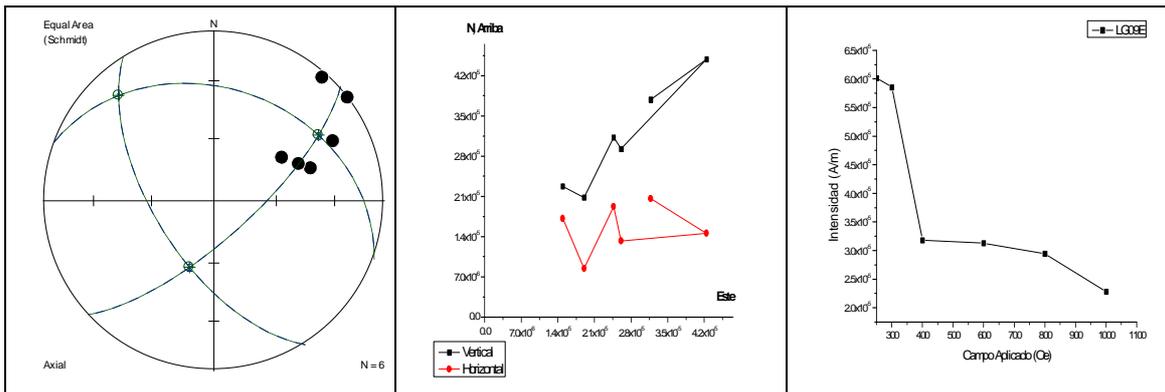


Tabla A.13 LG09E

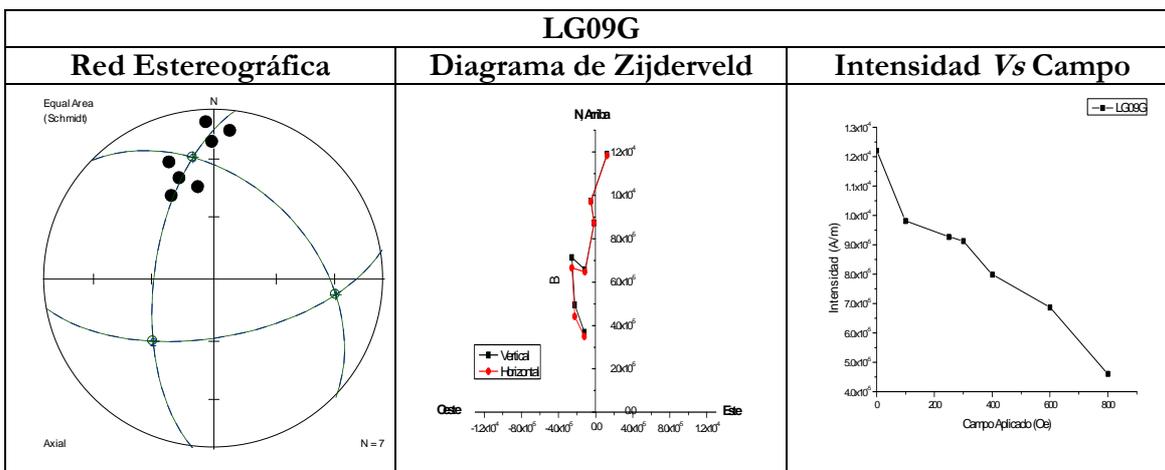


Tabla A.14 LG09G

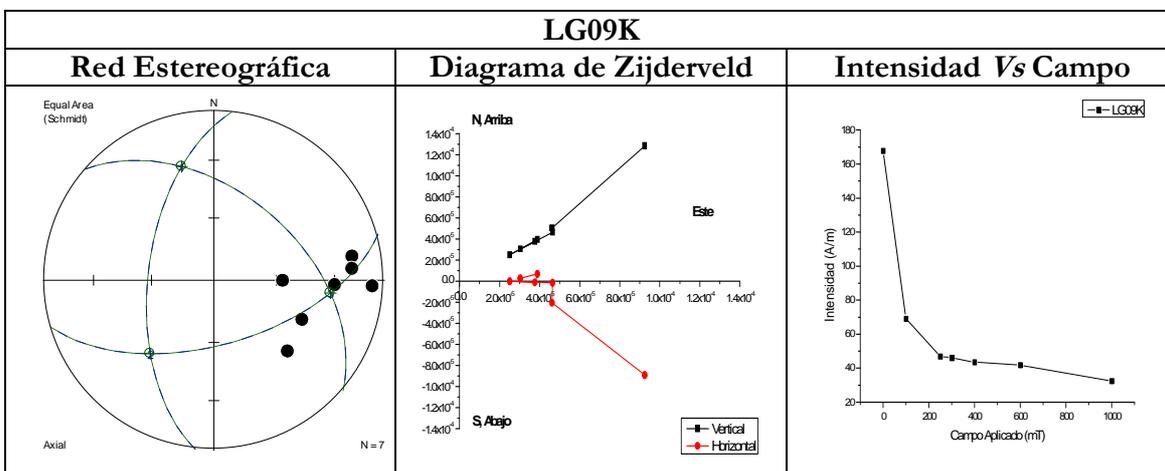


Tabla A.15. LG09

Al observar la red estereográfica de cada piloto desmagnetizado no se pudo determinar una dirección de la muestra.

## A.2 Especímenes de los cuáles sólo se tomó una dirección

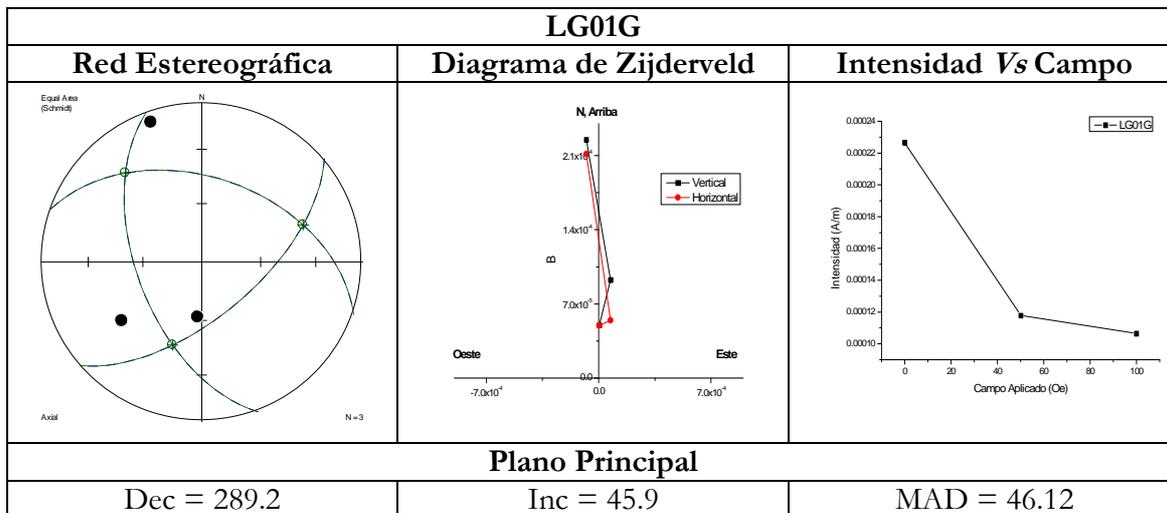


Tabla A.16 LG01G

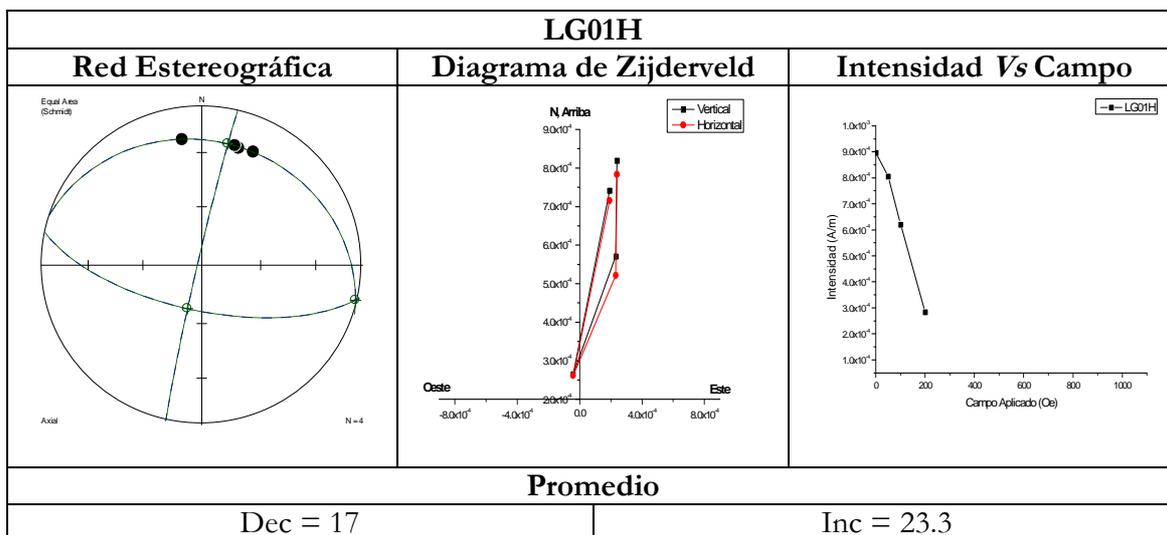


Tabla A.17 LG01H

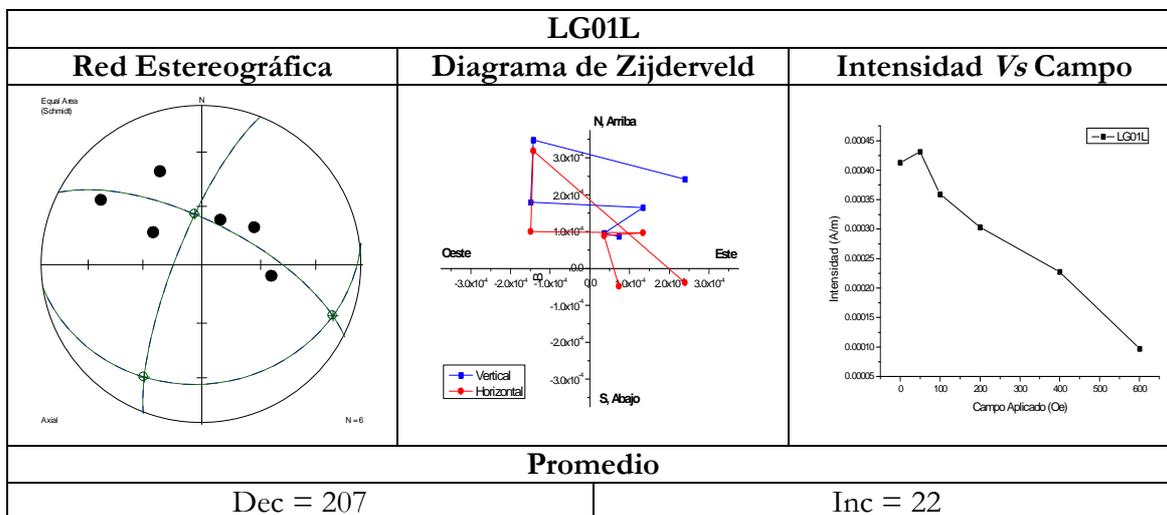


Tabla A.18 LG01L

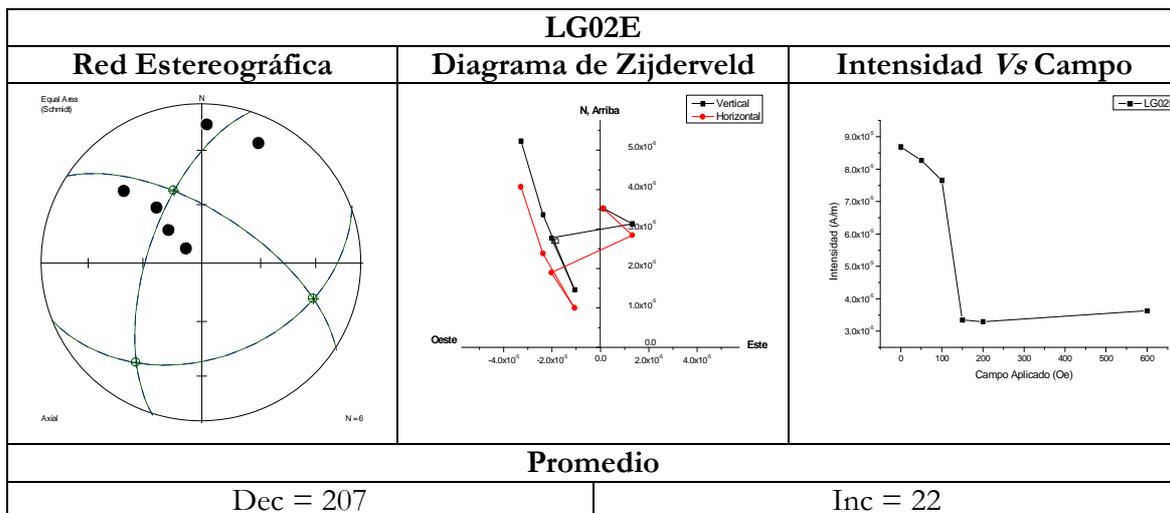


Tabla A.19 LG02E

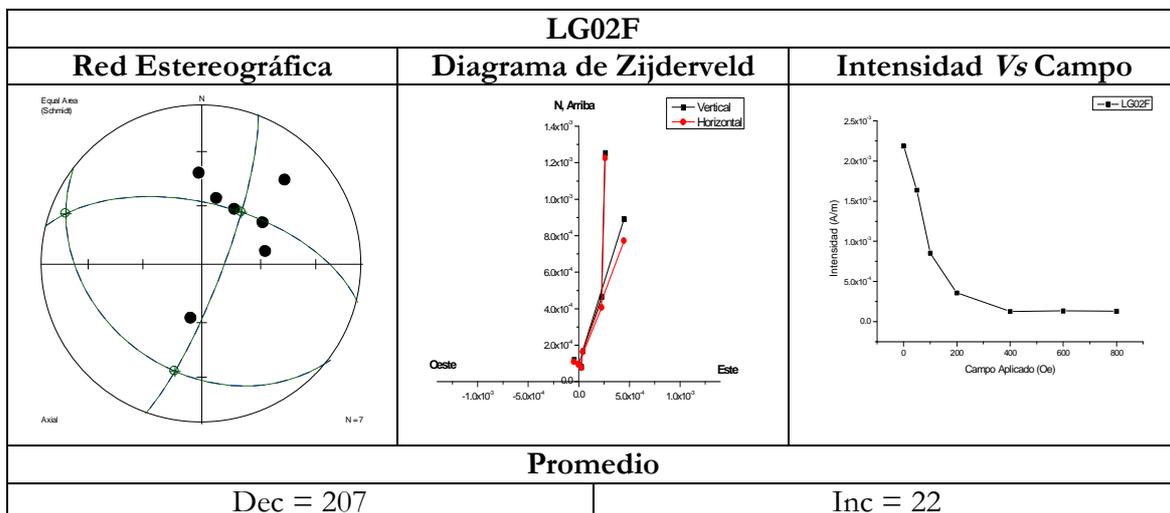


Tabla A.20 LG02f

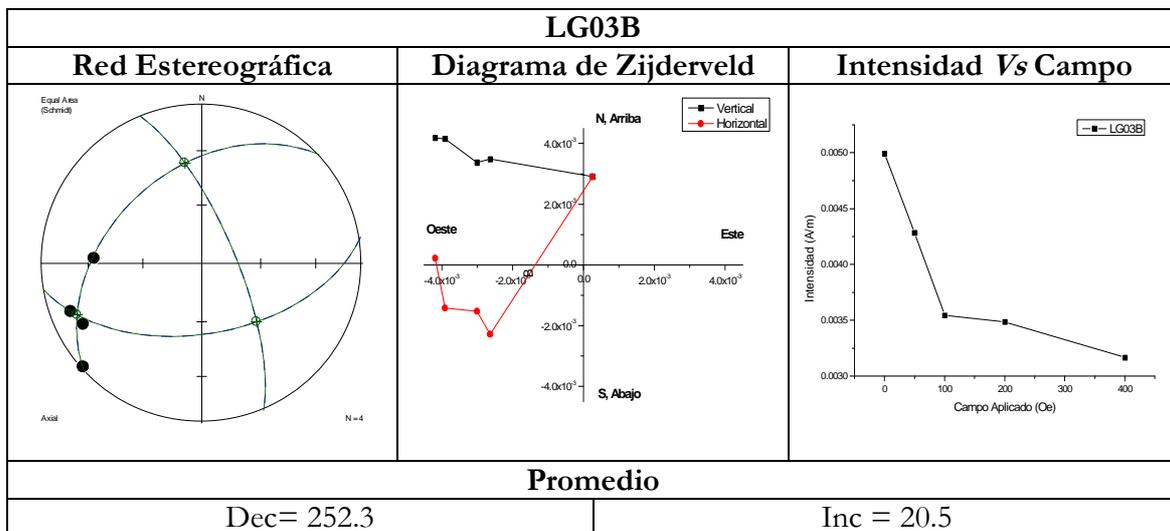


Tabla A.21 LG03B

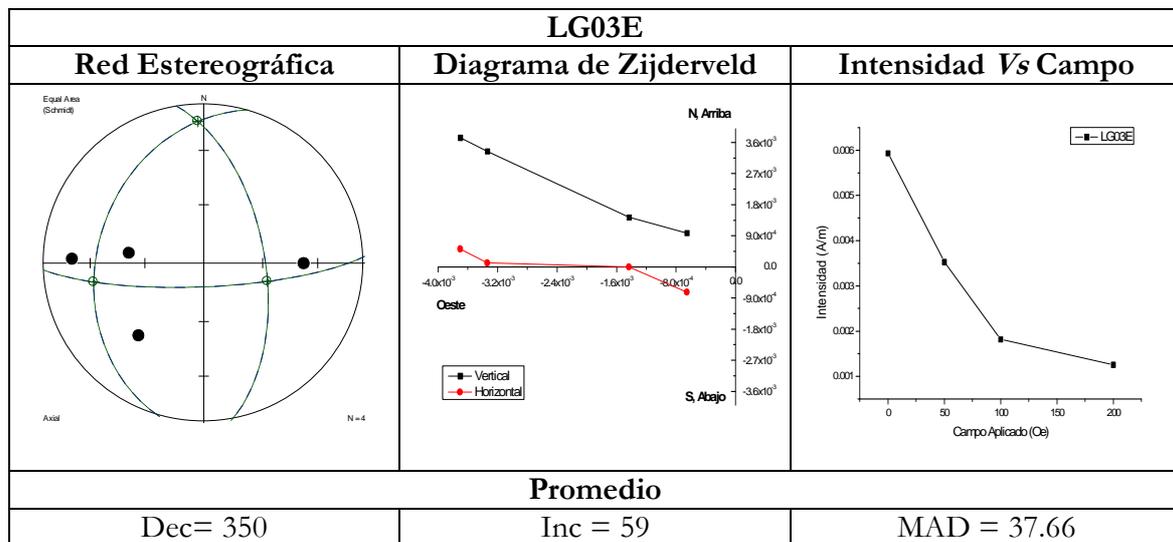


Tabla A.22 LG03E