



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

“Nuevos fechamientos arqueomagnéticos  
de Xalla y Teopancazco, zonas  
habitacionales de Teotihuacán”

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
F Í S I C O  
P R E S E N T A  
FABIÁN SÁNCHEZ LÓPEZ

ASESORA DE TESIS:  
DRA. ANA MARÍA SOLER ARECHALDE.



m344468



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



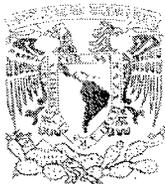
**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:  
"Nuevos fechamientos arqueomagnéticos de Xalla y Teopancazco, zonas  
habitacionales de Teotihuacán".

realizado por Sánchez López Fabián

con número de cuenta 09432405-5 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director

Propietario Dra. Ana María Soler Arechalde

*Andrés Soler*

Propietario Dr. Rubén Gerardo Barrera Pérez

*Rubén Barrera*

Propietario Lic. en Com. Luis Morett Alatorre

*Luis Morett*

Suplente Dra. Renela María Valladares Mc Nelis

*Renela Valladares*

Suplente Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi

*Jaime Urrutia*

**Consejo Departamental de Física**

*Alicia Zarzosa Pérez*  
M. en C. ALICIA ZARZOSA PEREZ



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

*A mis padres y mi hermano.  
A mis profesores y compañeros de estudio.*

*Y a todos los que me han acompañado  
durante esta etapa de mi vida.*

## Índice

	Pagina
<b>1.-Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2.- Origen del campo magnético y sus variaciones</b>	
2.1.- Origen del campo .....	2
2.2.- Origen de las variaciones .....	4
2.3.- Variaciones en el campo geomagnético .....	6
<b>3.- Magnetización de los materiales</b>	
3.1.- Principios de los mecanismos de magnetización .....	9
3.2.- Mecanismos de magnetización remanente .....	11
<b>4.- Procedimiento de medición</b>	
4.1.- Preparación de las muestras .....	16
4.2.- Medición .....	17
<b>5.- Representación de los datos</b>	
5.1.- Diagrama estereográfico .....	18
5.2.- Diagrama de Zijderveld .....	18
<b>6.- Método de análisis: Distribución de Fisher .....</b>	<b>19</b>
<b>7.- Muestras</b>	
7.1.- Especímenes .....	21
7.2.- Resultados .....	21
<b>8.- Conclusiones .....</b>	<b>26</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>28</b>
<b>Apéndice 1.....</b>	<b>30</b>
<b>Apéndice 2 .....</b>	<b>32</b>
<b>Apéndice 3 .....</b>	<b>83</b>

## **1. Introducción**

El objetivo del presente trabajo es obtener nuevos fechamientos de muestras de pisos y estucos obtenidas en la temporada de excavación de 2003 de Xalla y Teopancazco, zonas habitacionales de Teotihuacan. Existen trabajos arqueomagnéticos previos de estucos de las zonas de estos sitios en las tesis referidas en la bibliografía (Rodríguez, 2003, Hueda, 2000).

El fechamiento de estas muestras está basado en las propiedades de algunos materiales para conservar una magnetización remanente producida por el campo magnético de la Tierra. Existe evidencia de las variaciones tanto en dirección y magnitud del vector de este campo en cada punto de la superficie de la Tierra, así como también en el tiempo. Algunos de los periodos de duración de un estado del campo que han sido registrados son del orden de millones de años y otros de cientos de años, además de las variaciones diarias.

De estos cambios existe un registro a nivel global, sin embargo éste es sólo un promedio y a nivel local es necesario uno particular. La forma en como se dividen estos registros locales está relacionada con la estructura de las placas tectónicas. De esta forma para cada zona se tienen tablas de los datos de la dirección, sentido y magnitud del vector del campo.

Basado en esto se midió y se obtuvo el vector de la magnetización remanente de cada muestra para compararlo con los datos existentes de la región correspondiente. Los resultados de este método no son absolutos y por tanto deben ser discutidos con un arqueólogo, como se menciona más adelante.

De este modo debe quedar claro que el trabajo necesita del complemento aportado por otras áreas de estudio, que en este caso es de la arqueología, dada la naturaleza de las muestras.

## 2. Origen del campo magnético y sus variaciones

### 2.1 Origen del campo.

El geomagnetismo es la rama de la geofísica encargada del estudio del campo magnético terrestre, su origen, variación y morfología. El campo magnético puede ser descrito en un punto sobre la superficie terrestre por un vector con tres componentes: la declinación, la inclinación y la magnitud. Sobre un plano tangente a la superficie en el punto, llamado plano horizontal, se toman dos ejes ortogonales, uno tangente al meridiano con sentido hacia el norte geográfico (N) y el otro hacia el este (E). Un tercer eje ortogonal a los dos anteriores es tomado con sentido hacia el centro del planeta (V). La declinación (D) es el ángulo que forma la proyección del vector del campo sobre el plano horizontal con el eje paralelo al meridiano y la inclinación (I) el ángulo que forma el vector del campo con el plano horizontal. Por supuesto, la última componente es la intensidad del campo (H). (Figura 1.)

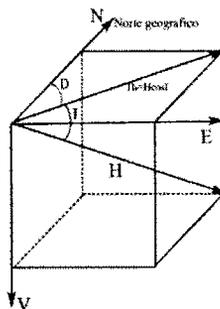


Figura 1. Componentes del campo magnético

Dada la abundante cantidad de hierro en el interior de la Tierra, los primeros modelos sobre el origen del campo magnético estuvieron centrados en considerar al planeta como un imán, esto es, un material en cuyo interior se encontraban alineados paralelamente los momentos magnéticos, para dar origen al campo.

Sin embargo estos modelos no tomaban en cuenta que las propiedades magnéticas de los materiales se pierden cuando son sometidos a altas temperaturas, como es el caso, ya que la temperatura a partir de 100 km de profundidad se incrementa hasta por encima de los 1000° C y continua aumentando en dirección al centro, de modo que la posibilidad de modelar el origen del campo como un imán queda descartada.

En la actualidad el modelo más aceptado es el de un dinamo retroalimentado que configura un campo dipolar, el cual se ilustra en la Figura 2.

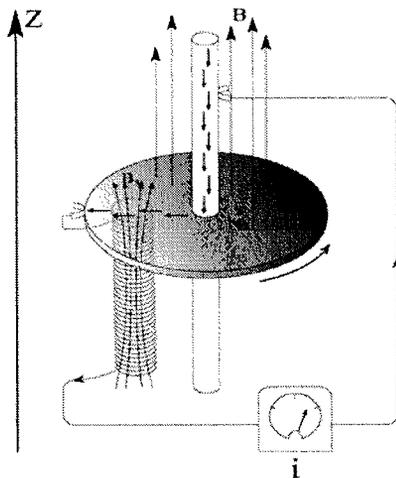


Figura2. Modelo del dinamo retroalimentado. (Butler ,1992)

Dado un campo magnético inicial  $B$  en la dirección del eje  $Z$ , se hace rotar un disco de un material conductor en sentido contrario a las manecillas del reloj, lo que producirá una corriente eléctrica en sentido radial sobre el disco. Haciendo contacto con un solenoide conductor como se muestra en la figura, se conduce la corriente hasta el eje de rotación del disco. Por la posición el solenoide, este producirá un campo magnético  $B_s$  paralelo al campo inicial, sumándose ambos para dar un campo resultante paralelo a  $Z$ . Cualquier variación en la velocidad del disco o en el campo  $B$ , derivarán en una variación en el campo resultante.

Para establecer la equivalencia entre dicho esquema y el mecanismo terrestre del origen del campo, se considera que el campo inicial tiene origen en la primera capa o corteza, comprendida en los primeros 10 km de profundidad a partir del fondo del mar. Es en esta capa en donde las temperaturas aun no exceden el punto de Curie para el hierro y para la magnetita( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) que es a los  $770^\circ\text{C}$  y  $680^\circ\text{C}$ , respectivamente, por lo tanto esta capa se encuentra magnetizada. La capa en movimiento o núcleo externo, la cual se encuentra en estado líquido, corresponde al disco que gira y finalmente las corrientes convectivas equivalen al solenoide.

Este modelo es el más simplificado y el mecanismo dentro de la Tierra debe ser mucho más complejo. Los modelos actuales del proceso de origen del campo, están enfocados a establecer el tipo de corrientes convectivas y la forma en como se retroalimenta el campo.

## **2.2 Origen de las variaciones**

Como se mencionó, cualquier variación en estos elementos, hablando ahora de la Tierra, produce una variación en el campo resultante, que en este caso es el que llamamos el campo geomagnético. Los modelos que han ayudado a entender la dinámica interna del planeta nos confirman que se encuentra en un cambio constante y que existe una relación con los movimientos planetarios de rotación y traslación alrededor del Sol, por lo que cualquier variación en ellos implica variaciones en el campo. De lo anterior, queda establecido que existe una relación directa entre las variaciones del campo y los cambios en la estructura interna planetaria. Por otro lado debe considerarse el campo magnético solar que también afecta al campo terrestre y de hecho tiene una contribución al campo del planeta. Es así que el campo geomagnético es la suma de estos elementos.

Las variaciones pueden ser desde un cambio en la polaridad del campo hasta simplemente cambios en el

vector alrededor de una dirección en un punto. La información de las variaciones de 100 millones de años a la fecha, nos muestra la existencia de periodos de 18 millones de años sin una sola inversión de la polaridad. Sin embargo, conforme ha pasado el tiempo estas inversiones se han presentado con mayor frecuencia, siendo la última hace 710 mil años y según las estimaciones las próximas podrían presentarse cada 200 mil años (Campbell, 1997). (Figura 3).

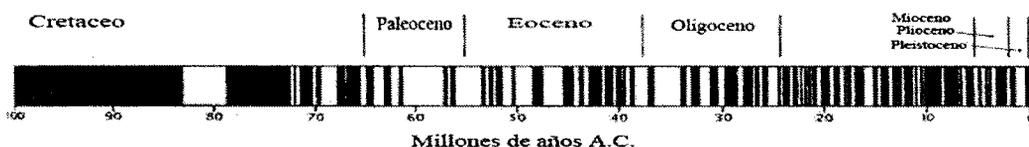


Figura 3. Las zonas en negro corresponden a una polaridad y las zonas en blanco a la polaridad contraria. (Campbell, 1997)

Dentro de estos periodos en los que prevalece una polaridad, tienen lugar otras variaciones en las que se distingue un desplazamiento del polo magnético respecto del polo geográfico a una razón de  $0.3^\circ$  a  $0.4^\circ$  por año (Butler, 1992). En la Figura 4 se muestra el registro desde el año 0 hasta 1980, en el que se aprecia la deriva del polo norte geomagnético en intervalos de 100 años. Los círculos alrededor de los puntos correspondientes a los polos geomagnéticos de los años 900, 1300 y 1700 representan los límites de confianza de un 95% para cada uno. El polo geomagnético promedio de los últimos 2000 años esta representado por el cuadrado siendo el círculo sombreado la región de 95% de confiabilidad del mismo.

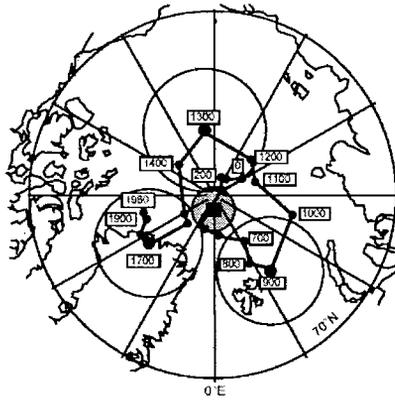


Figura 4. Movimiento del polo magnético desde el año 0 hasta 1980 (Butler, 1992)

### 2.3 Variaciones en el campo geomagnético

El campo geomagnético sufre variaciones con el tiempo que son rápidas en comparación con otros procesos geológicos. En la Tabla 1 se presentan las más importantes.

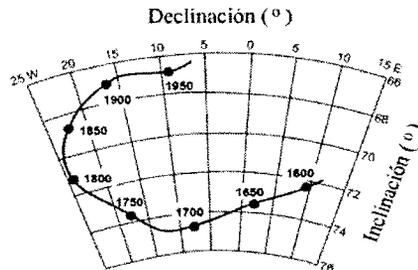
<i>Tipo</i>	<i>Duración en segundos</i>	<i>Causa</i>
<b>Muy cortas</b>	$3 \times 10^{-1}$ a $3 \times 10^1$	Campo externo
<b>Micropulsaciones</b>	$3 \times 10^{-1}$ a $3 \times 10^1$	Campo externo
<b>Variaciones subacústicas</b>	$3 \times 10^{-1}$ a $3 \times 10^1$	Campo externo
<b>Tormentas magnéticas</b>	$1 \times 10^2$	Campo externo
<b>Variación secular</b>	$3 \times 10^7$ a $3 \times 10^{12}$ (1 a $1 \times 10^5$ años)	Campo dipolar y no dipolar
<b>Excursiones</b>	$1 \times 10^{14}$ ( $3 \times 10^6$ años)	Inversiones abortadas
<b>Variaciones en intensidad</b>	$3 \times 10^{11}$ ( $9.5 \times 10^3$ años)	Campo dipolar
<b>Cambios de polaridad</b>	$3 \times 10^{14}$ ( $9.5 \times 10^6$ años)	Campo dipolar y no dipolar

Tabla 1

Se llama variación secular geomagnética a la fluctuación temporal del campo interno que sucede dentro de un intervalo de tiempo entre un año y  $10^5$  años. Sus orígenes pueden dividirse en 2 contribuciones con periodicidades que se traslapan:

- 1.- Cambios no bipolares en periodos cortos (menores a 3000 años)
- 2.-Cambios en el dipolo en periodos más largos

Con el promedio de los registros de valores del campo magnético en las estaciones de monitoreo, se observa que los cambios no son constantes como en el ejemplo (Figura 5).



**Figura 5. Variación secular desde 1600 registrada en el observatorio geomagnético de Londres (Butler, 1992)**

Los últimos 150 años corresponden a cambios del orden de  $0.25^\circ$  en la dirección y de 0.05 % en la intensidad anual. Los patrones de esta variación son similares en otras regiones de Europa, pero cambian de un continente a otro.

La variación secular no tiene periodicidad temporal definida. Hay momentos en que el campo estuvo relativamente en calma, mientras que en otros estuvo mucho más agitado, llegando a presentar excursiones de gran amplitud y corta duración.

Además de estos cambios en la orientación, el dipolo geomagnético tiene cambios en la magnitud del momento dipolar. En los últimos  $10^4$  años, el momento dipolar promedio es de  $8.75 \times 10^{25} \text{ G cm}^3$  ( $8.75 \times 10^{22} \text{ A m}^2$ ), presentando cambios con una periodicidad aproximada de  $10^4$  años con oscilaciones de  $\pm 50\%$  del valor medio (Butler, 1992).

En escalas de tiempo mayores, el campo magnético invierte su polaridad. La configuración actual con la dirección del dipolo hacia el polo sur geográfico es la polaridad normal, mientras que la dirección opuesta es la polaridad inversa, con un cambio de  $180^\circ$  en la superficie geomagnética en dirección de todos sus puntos.

Hay muchos lugares de donde no se tiene registro de la variación secular, pero ésta puede ser determinada por medio de estudios arqueomagnéticos o paleomagnéticos, utilizando los vestigios dejados por culturas antiguas, que han sido fechados por algún método directo como la prueba de  $^{14}\text{C}$  por ejemplo. Una vez obtenida la curva de la variación secular del campo magnético del lugar, es posible proponer una o varias fechas para una muestra arqueológica dada, midiendo sus direcciones magnéticas y comparándolas con dicha curva.

En el caso de Mesoamérica, diversos estudios han contribuido a generar una curva de variación secular. La mayor contribución fue hecha por Wolfman, ya que comparó las fechas aportadas por estudios previos hechos en diversos sitios mesoamericanos, donde se usaron varias técnicas de fechamiento como la del  $^{14}\text{C}$ , con direcciones magnéticas de muestras de los mismos sitios (Wolfman, 1973, 1990). Otra fuente de datos la aportaron Latham et al (1989), fechando por medio de  $^{230}\text{Th}$  y de  $^{234}\text{U}$ , muestras de estalagmitas de cuevas de San Luis Potosí y Chiapas, que abarcan un periodo de 1259 años. Posteriormente obtuvieron su variación secular con métodos paleomagnéticos, es decir, la fluctuación temporal del campo interno en esos sitios y en fechas determinadas. Comparando la dirección de la variación secular de una muestra arqueológica proveniente de este sitio con esta curva, se pueden obtener una o varias fechas probables.

### 3. Magnetización de los materiales

#### 3.1 Principios de los mecanismos de magnetización

El *Paleomagnetismo* tiene como objetivo profundizar en el estudio del campo geomagnético sustentado en tres aspectos: el primero se refiere a la física de las estructuras atómicas, moleculares y granulares de los materiales en los que se lleva a cabo un proceso de magnetización. Con esta base se definen las técnicas para medir las muestras que puedan presentar una magnetización remanente. El segundo aspecto es el del estudio de los procesos físicos que producen dicha magnetización, así como de las técnicas de muestreo. Finalmente la interpretación y la aplicación de los datos obtenidos deben conducir a establecer la relación que existe entre el campo magnético y los procesos en el interior de la Tierra que lo originan.

En relación con el primer punto y para los fines de este trabajo, se ha considerado a los materiales de prueba como matrices compuestas de granos cuyos átomos tienen momento magnético dipolar. Así, puede darse el caso que dentro de un grano y ante la presencia de un campo magnético ( $H$ ), se encuentren alineados dichos momentos en forma paralela, a lo cual se le llama magnetización ( $J$ ). Por otra parte, no todos los momentos magnéticos deben de alinearse necesariamente en la forma descrita. Es posible también que existan distintas alineaciones divididas por regiones, a las que se denominan *dominios*, espacios que se encuentran delimitados en regiones en donde las fuerzas de atracción y repulsión internas mantienen un equilibrio estático (Figura 6).

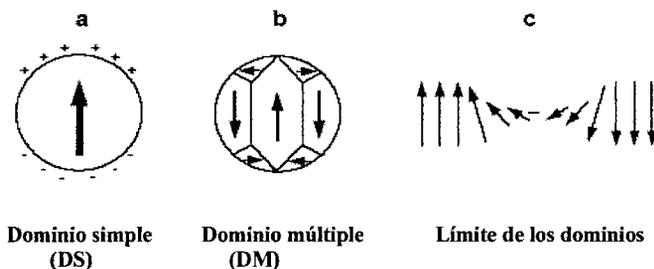


Figura 6. Dominios magnéticos

Existen tres tipos de materiales de acuerdo a sus propiedades magnéticas: los diamagnéticos son aquellos a los que al momento de aplicarles un campo magnético en cierta dirección, se induce sobre ellos una magnetización en sentido opuesto al campo aplicado y cuya susceptibilidad magnética  $\chi$  es menor de  $10^{-5}$  SI. Si el campo desaparece, la magnetización se vuelve nula (Fig. 7a). Los paramagnéticos cuya respuesta a una aplicación de un campo es una magnetización inducida en sentido paralelo en la dirección del mismo y que también desaparece a la desaparición del campo externo (Fig. 7b). La susceptibilidad en estos materiales es desde  $10^{-3}$  hasta  $10^{-5}$  SI. Finalmente los ferromagnéticos que son aquellos que reaccionan a un campo externo alineándose a éste en forma paralela y en la misma dirección, con la diferencia respecto a los paramagnéticos de que la magnetización adquirida no disminuye a cero si el campo desaparece, es decir, que presenta histéresis (Fig. 7c), sus susceptibilidades son del orden de  $10^5$  SI. Esta característica hace a estos materiales los más adecuados para la búsqueda de magnetización remanente. Ejemplos de este tipo de material son la hematita( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y magnetita( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

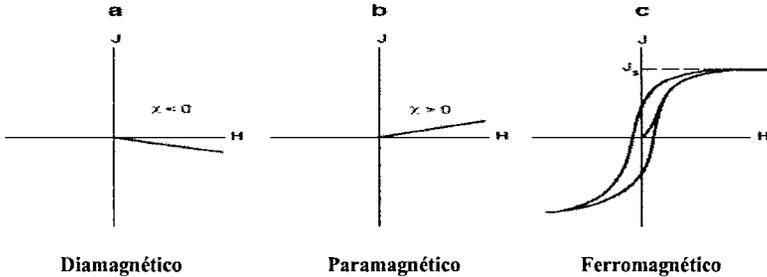


Figura 7. Magnetización de distintos tipos de materiales

La magnetización de los materiales ferromagnéticos tiene un límite máximo de saturación ( $J_s$ ). Esto significa que si a un material ferromagnético se le aplica un campo con un valor en magnitud superior al necesario para alcanzar dicho límite, la magnetización no sobrepasará dicho punto. Sin embargo el punto de saturación disminuye en forma inversa al cambio de la temperatura, lo que hace que las propiedades magnéticas de estos materiales desaparezcan al aumentar ésta. La temperatura a la cual la magnetización desaparece es denominada *temperatura de Curie* y ésta es característica de cada material. Para la hematita

esta temperatura es de 680°C y para la magnetita es de 580°C (Butler, 1992).

Los materiales ferromagnéticos dado que presentan histéresis, al aplicárseles un campo magnético hasta el punto de saturación y en un cierto momento desactivar su acción, pasará un cierto periodo de tiempo  $\tau$  para que la magnetización decaiga hasta cero, obteniéndose una magnetización remanente. A este periodo se le denomina *tiempo de relajación*, el cual depende a su vez de la temperatura a la que se realice este proceso.

El decaimiento de la magnetización remanente para granos de dominio simple tiene la siguiente expresión:

$$J_r(t) = J_{r0} \exp(-t/\tau)$$

$J_r$  = magnetización inicial remanente

$t$  = tiempo en segundos

$\tau$  = tiempo de relajación característico(s) después del cual  $J_r = J_{r0}/e$

mientras que el tiempo de relajación tiene la forma siguiente:

$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{v h_c j_s}{2kT}\right)$$

$C$  = factor de frecuencia ( $10^8 \text{ s}^{-1}$ )

$v$  = volumen del grano de DS

$h_c$  = fuerza coercitiva microscópica de un grano de DS

$j_s$  = magnetización de saturación

$kT$  = energía térmica

En esta última expresión, el término  $vh_c j_s$ , representa una barrera de energía propia del dominio del grano que se opone a la rotación mientras que el producto  $kT$  representa la energía térmica, de tal forma que el tiempo de relajación depende de la razón que existe entre ellos.

### 3.2 Mecanismos de magnetización remanente

A la magnetización producida en una muestra de material por el campo geomagnético, se le conoce como *magnetización natural remanente* o NRM por sus siglas en inglés. Dicha magnetización puede producirse

durante la formación de la matriz del material o bien si se produce una alteración geológica intensa física o química durante este periodo. A esta magnetización se le conoce como *magnetización remanente primaria*. Es posible también que posterior al periodo de su formación, la muestra haya estado expuesta, bajo ciertas condiciones, a un campo magnético distinto al que produjo la primera magnetización o bien por alteraciones químicas en los materiales ferromagnéticos, a lo que se le llama *magnetización remanente secundaria*. Si un material es calentado a una temperatura mayor que su temperatura de Curie ( $T_c$ ), los momentos magnéticos de sus átomos toman posiciones arbitrarias entre si y por lo tanto no puede haber magnetización. Al disminuir la temperatura por debajo de la  $T_c$ , una magnetización configurarse. En un valor cercano a  $T_c$ , el tiempo de relajación de la magnetización puede ser de fracciones de segundo, que para los fines de un estudio paleomagnético es inútil. A este comportamiento en el material se le denomina superparamagnético. Para materiales como la magnetita en el caso de DS, se presenta un comportamiento superparamagnético a los 575°C, siendo su tiempo de relajación de 1 $\mu$ s, pero a los 510°C su valor excede la edad de la Tierra. (Figura 8)

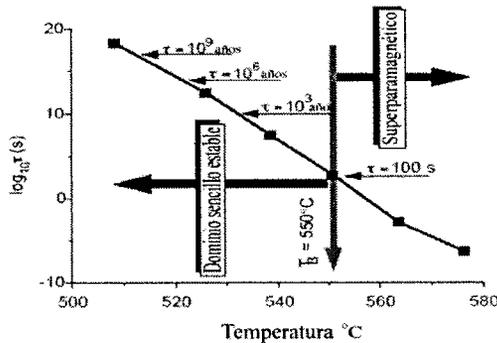


Figura 8. Gráfica del punto de la temperatura de bloqueo. (Butler, 1992)

Si se establece un tiempo de relajación crítico a los 100 s, esto es, el tiempo mínimo que se necesita para poder medir la magnetización remanente, el cual dependerá de la necesidad del estudio, se alcanza un punto en el cual se presenta la transición de un comportamiento a otro a los 550°C. Este valor de la

temperatura es conocido como *temperatura de bloqueo* ( $T_b$ ).

De modo que el proceso de magnetización comienza con un calentamiento del material cercano o por encima del valor de su  $T_c$  y conforme esta va disminuyendo se van alcanzando distintos puntos de  $T_b$  para distintos tiempos de relajación, los cuales pueden ir desde  $10^9$  hasta  $10^{-3}$ s.

Es importante aclarar que en el ejemplo dado de la magnetita, se tomó el caso de un grano de DS, sin embargo para el caso de un material con granos de DM se lleva a cabo un proceso similar. Como puede ser visto en la ecuación para el tiempo de relajación para un grano de DS, lo que determina su valor en esencia es la razón  $\nu h_c j_s / 2kT$ , es decir, que este tiempo tiene una dependencia del volumen del grano  $v$ . En un material con granos de DM, estos además de ser distintos entre sí por su orientación del momento dipolar, también lo son, en general, distintos en volumen y de hecho resulta que no en todos sus dominios, los momentos se orientan en la misma dirección. El resultado es que la magnetización es un promedio de las distintas orientaciones de los momentos. Así en un solo grano puede haber incluso distintos puntos de  $T_b$  para un mismo tiempo de relajación, que se van alcanzando conforme el material se enfría. Aun con esta diferencia el proceso de magnetización es análogo al caso de granos de DS.

Otro mecanismo de magnetización, es aquel que tiene lugar durante la sedimentación de algunos materiales. En ocasiones, durante este proceso, los distintos minerales que constituyen el material no se encuentran en equilibrio químico entre sí o con el ambiente de depositación, por lo que ocurren reacciones durante la sedimentación. También ocurre que posterior a la depositación y si el medio aún lo permite, se puede magnetizar el material. Estos factores en conjunto complican el estudio y los modelos para describir la magnetización por este mecanismo, por lo que el grado de incertidumbre en los datos es mayor comparado con el de la incertidumbre en el caso de la magnetización térmica.

El modelo clásico y más simple que describe este mecanismo consiste en considerar un grano de DS esférico con momento magnético  $\mathbf{m}$ , inmerso en un fluido con viscosidad  $\eta$ , sometido a un campo magnético  $\mathbf{H}$  y en el  $\mathbf{m}$  y  $\mathbf{H}$  forman un ángulo  $\theta$ . La ecuación que describe el movimiento del grano es:

$$\Omega \left( \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) + \beta \left( \frac{d\theta}{dt} \right) + mH \sin \theta = 0$$

El primer término describe la resistencia inercial a la aceleración angular y  $\Omega$  representa el momento de inercia de la partícula dado por  $\Omega = \pi d^5 \rho / 60$ , donde  $\rho$  es la densidad de la partícula y  $d$  su diámetro. El segundo describe la interacción entre la partícula y el fluido circundante en donde  $\beta = \pi d^3 \eta$ . Para valores apropiados de las partículas ferromagnéticas, el primer término es despreciable y en este caso se considera que el grano rota lo suficientemente rápido como para que el ángulo  $\theta$  sea del orden de  $\sin \theta$ , así se obtiene una simplificación de la ecuación de la forma siguiente:

$$\frac{d\theta}{dt} = - \left( \frac{mH\theta}{\pi d^3 \eta} \right)$$

cuya solución es:

$$\theta(t) = \theta_0 \exp\left(\frac{-t}{t_0}\right)$$

donde:

$$t_0 = \left( \frac{\pi d^3 \eta}{mH} \right)$$

El término  $t_0$  representa el tiempo característico para que el momento magnético vaya de  $\theta_0$  a  $\theta_0/e$ . Por otra parte y si sustituimos el valor del momento magnético de la partícula dado por  $m = \pi d^3 j / 6$  en  $t_0$ , se obtiene  $t_0 = 6\eta/jH$ , o sea que no depende del diámetro de la partícula. El término  $j$  es el momento magnético por unidad de volumen.

Para obtener una estimación del valor de  $t_0$ , tómnense los valores:  $\eta=10^{-2}$  poise (valor apropiado para el agua),  $H=0.5$  Oe (valor del campo geomagnético) y  $j=0.1$  G (valor para un grano de DM). Así el resultado es de  $t_0=1$  s, es decir, tiempo suficiente para alinearse durante el proceso de sedimentación.

Como ya se mencionó y analizando el anterior modelo, existen otros factores que no están incluidos en estas ecuaciones, por lo que los resultados en ocasiones y dependiendo de las condiciones no son necesariamente de este orden.

Debido a la dificultad de encontrar un modelo general, la evidencia experimental ha aportado resultados que confirman la magnetización posterior a la depositación, describiendo en parte la razón por la cual los resultados prácticos no siempre cumplen con el modelo clásico. Los granos tienen una anisotropía dada por la forma, que alinea los momentos magnéticos con el eje mayor del mismo, en particular cuando son elongados. Al descender para su depositación y llegar al fondo, los granos adoptan la posición más horizontal, perdiéndose gran parte de la dirección impuesta por el campo magnético. Sin embargo en los experimentos realizados, se ha observado que la magnetización obtenida se aproxima lo suficiente al valor que se esperaba de acuerdo al campo aplicado como para concluir que después de la depositación y ya asentados los granos, se produce la magnetización (Butler, 1992). (Figura 9)

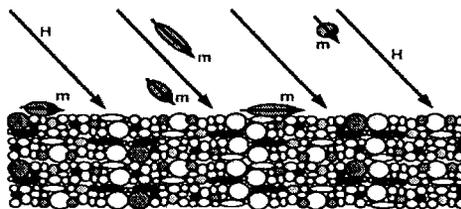


Figura 9. Proceso de magnetización por depositación (Butler, 1992)

Existe un mecanismo más de magnetización producido por cambios naturales de presión, temperatura y acidez en materiales ferromagnéticos que pueden elevar su temperatura por encima del punto de Curie que

tiene como consecuencia generar las condiciones para producir una magnetización, sin embargo este caso no es contemplado en el presente trabajo, por lo que no se abundará más en él. A este tipo de proceso se le denomina magnetización química.

#### **4. Procedimiento de medición**

##### **4.1 Preparación de las muestras**

Las muestras que se tomaron de la zona arqueológica eran bloques compuestos de capas, las cuales eran básicamente 2, una del suelo del lugar (apisonado) y la otra propiamente del piso que era la que contenía la información magnética. Esta última era en promedio de 4mm de espesor en todas las muestras, y por la naturaleza de los materiales que la formaban, resultaba de extrema importancia un manejo cuidadoso por ser quebradiza a la manipulación. Sobre la superficie de cada bloque fue colocado un cilindro de madera de 2.5 cm de diámetro por 0.5 cm de alto, fijado con pegamento epóxico. Sobre él se marcó un vector paralelo al eje azimutal, y sobre él se determinó la inclinación del mismo. Una vez extraídos los bloques del piso o estuco se pegaron más cilindros de madera sobre la superficie restante y se marcó en cada uno de ellos un vector paralelo al vector ya marcado en el primer cilindro. Así se tuvieron varias muestras que en algunos casos fueron 2 y en otros hasta 8, dependiendo del tamaño del bloque. El siguiente paso fue remover el apisonado del estuco, para que únicamente éste quedara adherido al cilindro (Figura 10). Finalmente se le colocó un segundo cilindro aprisionando la muestra para consolidación. De esta forma cada muestra quedó preparada para su medición.



**Figura 10. Montaje de las muestras.**

## 4.2 Medición

Para obtener el vector de la magnetización remanente primaria de cada muestra, fue necesario someterlas a un proceso de desmagnetización. El instrumento usado para este fin consiste en una bobina sin núcleo en cuyo centro se pone a la muestra en rotación, se aplica un campo magnético alterno débil respecto de su MRN, provocando que los granos cuyos momentos magnéticos que tienen una magnitud del orden de la magnitud del campo aplicado, se orienten en forma arbitraria destruyendo así la magnetización correspondiente a esa magnitud. Los granos cuyos momentos magnéticos tienen una magnitud mayor a la del campo aplicado no se ven afectados. Este procedimiento se repite aumentando en cada paso la magnitud del campo aplicado hasta destruir en un 90% la magnetización original, esto es, al final del proceso sólo queda la magnetización más intensa de la muestra. Entre cada paso se determina la dirección e intensidad de la magnetización en un magnetómetro JR5.

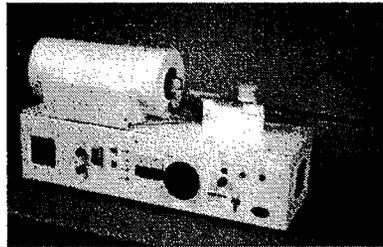


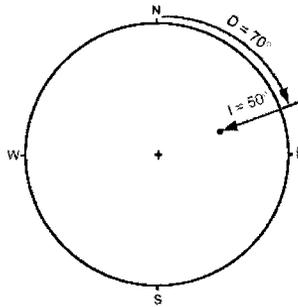
Figura 11. Fotografía del desmagnetizador de campos alternos marca Molspin.

El magnetómetro JR5 utilizado para obtener el vector de magnetización de las muestras funciona en base a hacer rotar la muestra respecto de dos ejes perpendiculares respectivamente, tanto en una dirección positiva como negativa, lo que induce, por ley de Faraday, una corriente alterna en una bobina. La amplitud de la señal depende de la magnitud de la magnetización de la muestra mientras que la fase depende de la dirección de la misma. Dicha señal es amplificada, filtrada y digitalizada para ser traducida por una computadora, mediante un análisis de Fourier, en las componentes del vector de la magnetización.

## 5 Representación de los datos

### 5.1 Diagrama estereográfico

Este tipo de diagrama es una circunferencia en la que es posible graficar los valores de los ángulos de declinación e inclinación sin necesidad de tomar en cuenta la magnitud del vector. Se establece una escala de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  en el sentido de las manecillas del reloj sobre el perímetro de la circunferencia y sobre el eje horizontal que atraviesa el centro se establece otra desde el perímetro hacia el centro de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . (Fig. 11)



**Figura 12. Ejemplo de la representación de un vector cuyos valores de la declinación e inclinación son  $D=70^\circ$  y  $I=50^\circ$  (Butler, 1992)**

### 5.2 Diagrama de Zijderveld

Es una doble proyección del vector de magnetización sobre los planos NE y EV, en la que es posible apreciar los ángulos de declinación e inclinación respectivamente, tomando en cuenta su magnitud. Si se grafican los puntos que representan al vector en este diagrama en el proceso de desmagnetización y se unen mediante líneas, es posible identificar si existe una tendencia a una dirección hacia el final del proceso (Figura 13).

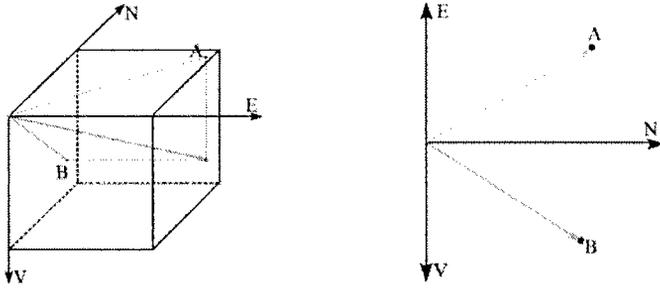


Figura 13.

## 6. Método de análisis: Distribución de Fisher

Para el análisis de los datos paleomagnéticos se utiliza una distribución normal desarrollada por el británico R. A. Fisher. Para esta distribución se tiene la expresión para calcular la probabilidad de encontrar una dirección dentro de un área angular  $dA$ , centrada a un ángulo  $\theta$  desde el valor medio, dada por:

$$P_{dA}(\theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh(\kappa)} \exp(\kappa \cos \theta)$$

donde  $\kappa$  es un parámetro de precisión que indica la concentración de la distribución alrededor de la dirección media de las direcciones sobre una esfera unitaria.

Si  $\zeta$  es el ángulo alrededor de la dirección, la probabilidad de hallar una dirección dentro de un área angular  $dA$  es:

$$P_{dA}(\theta)dA = P_{dA}(\theta) \sin \theta d\theta d\zeta$$

La normalización de la función de Fisher es entonces:

$$\int_{\zeta=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} P_{dA}(\theta) \sin(\theta) d\theta d\zeta = 1.0$$

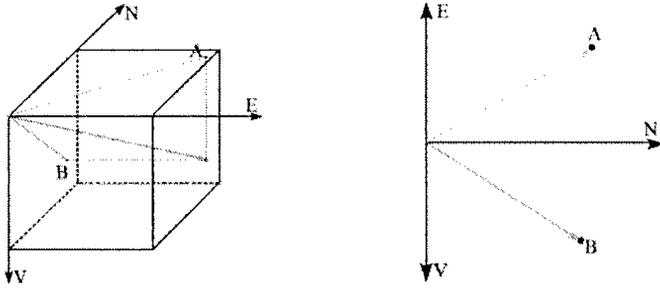


Figura 13.

## 6. Método de análisis: Distribución de Fisher

Para el análisis de los datos paleomagnéticos se utiliza una distribución normal desarrollada por el británico R. A. Fisher. Para esta distribución se tiene la expresión para calcular la probabilidad de encontrar una dirección dentro de un área angular  $dA$ , centrada a un ángulo  $\theta$  desde el valor medio, dada por:

$$P_{dA}(\theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh(\kappa)} \exp(\kappa \cos \theta)$$

donde  $\kappa$  es un parámetro de precisión que indica la concentración de la distribución alrededor de la dirección media de las direcciones sobre una esfera unitaria.

Si  $\zeta$  es el ángulo alrededor de la dirección, la probabilidad de hallar una dirección dentro de un área angular  $dA$  es:

$$P_{dA}(\theta)dA = P_{dA}(\theta) \sin \theta d\theta d\zeta$$

La normalización de la función de Fisher es entonces:

$$\int_{\zeta=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} P_{dA}(\theta) \sin(\theta) d\theta d\zeta = 1.0$$

Así, la probabilidad  $P_{dA}(\theta)$  de hallar una dirección dentro de una banda de ancho  $d\theta$  entre  $(\theta, \theta+d\theta)$  esta dada por :

$$P_{d\theta}(\theta) = \int_{\xi=0}^{2\pi} P_{dA}(\theta) dA = 2\pi P_{dA}(\theta) \sin(\theta) d\theta = \frac{\kappa}{2 \sinh(\kappa)} \exp(\kappa \cos \theta) \sin \theta d\theta$$

Con esta expresión es posible calcular el ángulo a partir de la media dentro del cual se encuentra el 95% de las direcciones con:

$$\theta_{95} = \frac{140^\circ}{\sqrt{\kappa}}$$

Para obtener el valor de la dirección media se suman vectorialmente todas las direcciones y se toman los cosenos directores de sus componentes  $l_i = \cos I_i \cos D_i$ ,  $m_i = \cos I_i \sin D_i$ ,  $n_i = \sin I_i$ .



Figura 14. R es la magnitud de la suma vectorial. (Butler, 1992)

Así se obtiene:

1) *Dirección media:*

$$l = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{R} \quad m = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{R} \quad n = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{R}$$

2) *Estimación de la dispersión:*

$$k = \frac{N-1}{N-R}$$

donde N es el número total de direcciones.

3) *Límite de confianza de la dirección media*: se expresa como un radio angular desde la dirección media calculada.

para  $k > 10$  y  $N > 10$

$$\alpha_{95} \approx \frac{140^\circ}{\sqrt{kN}}$$

donde  $\alpha_{95}$  da una medida de la precisión con la cual ha sido estimada la dirección media, es decir, se tiene la certeza del 95% de que la dirección media real del conjunto de muestras cae dentro de  $\alpha_{95}$ .

## 7. Muestras

### 7.1 Especímenes

El número total de muestras con las que se trabajó fue de 60. Sin embargo 5 de ellas fueron desechadas para el análisis final debido a que o bien sufrieron algún daño irreparable durante la medición y antes de concluir la misma, o el resultado de la medición no mostró ninguna tendencia hacia un valor definido.

Estas fueron clasificadas de acuerdo a la zona habitacional a la que pertenecían (Xalla(X) o Teopancazgo(T)), al sector (1,2,3...) y al espécimen (a,b,c...), quedando entonces como X1-A, X9-F, T2-C, T4-A, etc. La representación de los resultados fue realizada en el programa PCA1 y su análisis de Fisher en FISH1 en GWBASIC.

### 7.2 Resultados

De cada muestra fue graficado su comportamiento: red estereográfica, diagrama de Zijderveld y curva de desmagnetización (Apéndice 2), con el fin de obtener la dirección remanente característica que es la que

3) *Límite de confianza de la dirección media*: se expresa como un radio angular desde la dirección media calculada.

para  $k > 10$  y  $N > 10$

$$\alpha_{95} \approx \frac{140^\circ}{\sqrt{kN}}$$

donde  $\alpha_{95}$  da una medida de la precisión con la cual ha sido estimada la dirección media, es decir, se tiene la certeza del 95% de que la dirección media real del conjunto de muestras cae dentro de  $\alpha_{95}$ .

## 7. Muestras

### 7.1 Especímenes

El número total de muestras con las que se trabajó fue de 60. Sin embargo 5 de ellas fueron desechadas para el análisis final debido a que o bien sufrieron algún daño irreparable durante la medición y antes de concluir la misma, o el resultado de la medición no mostró ninguna tendencia hacia un valor definido.

Estas fueron clasificadas de acuerdo a la zona habitacional a la que pertenecían (Xalla(X) o Teopancazgo(T)), al sector (1,2,3...) y al espécimen (a,b,c...), quedando entonces como X1-A, X9-F, T2-C, T4-A, etc. La representación de los resultados fue realizada en el programa PCA1 y su análisis de Fisher en FISH1 en GWBASIC.

### 7.2 Resultados

De cada muestra fue graficado su comportamiento: red estereográfica, diagrama de Zijderveld y curva de desmagnetización (Apéndice 2), con el fin de obtener la dirección remanente característica que es la que

aparece en las tablas a continuación (Tablas 2 a 10). Los dos últimos renglones muestran la dirección promedio y los parámetros de la estadística Fisher para un 95% de confiabilidad, respectivamente.

### Xalla

<b>XALLA1</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>
<b>X1-A</b>	350.3	39.9
<b>X1-B</b>	355.6	40.1
<b>X1-C</b>	357.1	37.1
<b>X1-D</b>	358.9	36.3
<b>Promedio</b>	<b>355.5</b>	<b>38.4</b>
<b>R=3.994459</b>	<b>k=541.3635</b>	<b><math>\alpha_{95}=3.95</math></b>

Tabla 2

<b>XALLA2</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>
<b>X2-A</b>	355.6	37.1
<b>X2-B</b>	355.5	39.1
<b>X2-D</b>	353.3	38.3
<b>X2-E</b>	354.3	29.9
<b>Promedio</b>	<b>354.7</b>	<b>36.1</b>
<b>R=3.991545</b>	<b>k=354.8081</b>	<b><math>\alpha_{95}=4.88</math></b>

Tabla3

<b>XALLA3</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>
<b>X3-A</b>	9.8	40.4
<b>X3-B</b>	9.5	39.7
<b>X3-C</b>	352.8	44.7
<b>Promedio</b>	<b>4.3</b>	<b>41.9</b>
<b>R=2.98214</b>	<b>k=111.981</b>	<b><math>\alpha_{95}=11.7</math></b>

Tabla 4

<b>XALLA5</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>
<b>X5-A</b>	356.3	35.1
<b>X5-B</b>	356.6	34.1
<b>Promedio</b>	<b>356.5</b>	<b>34.6</b>
<b>R=1.999919</b>	<b>k=12372.58</b>	<b><math>\alpha_{95}=2.24</math></b>

Tabla 5

<b>XALLA8</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>
<b>X8-A</b>	359.3	43.5
<b>X8-B</b>	356.4	48.3
<b>X8-C</b>	355.2	45.5
<b>X8-D</b>	353.9	45.7
<b>Promedio</b>	<b>356.2</b>	<b>45.8</b>
<b>R=3.997019</b>	<b>k=1006.311</b>	<b><math>\alpha_{95}=2.89</math></b>

Tabla 6

<b>XALLA9</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>
<b>X9-A</b>	348.0	40.2
<b>X9-B</b>	356.2	45.0
<b>X9-C</b>	355.4	42.5
<b>X9-D</b>	356.8	42.1
<b>X9-E</b>	359.2	39.9
<b>X9-F</b>	353.9	43.7
<b>X9-G</b>	354.4	43.6
<b>X9-H</b>	357.2	43.6
<b>Promedio</b>	<b>355.1</b>	<b>42.6</b>
<b>R=7.989993</b>	<b>k=699.517</b>	<b><math>\alpha_{95}=2.09</math></b>

Tabla 7

**Teopancazco**

<b>TEOPNCZC1</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>
<b>T1-A</b>	359.3	43.5
<b>T1-B</b>	356.4	48.3
<b>T1-C</b>	355.2	45.5
<b>T1-D</b>	353.9	45.7
<b>T1-E</b>	351.5	53.4
<b>T1-F</b>	347.4	41.3
<b>Promedio</b>	<b>353.9</b>	<b>46.3</b>
<b>R=5.98009</b>	<b>k=251.1319</b>	<b><math>\alpha_{95}=4.23</math></b>

**Tabla 8**

<b>TEOPNCZC2</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>
<b>T2-A</b>	344.7	60.4
<b>T2-B</b>	357.5	23.9
<b>T2-C</b>	349.5	40.4
<b>T2-D</b>	330.7	37.5
<b>Promedio</b>	<b>346.2</b>	<b>41.0</b>
<b>R=3.860864</b>	<b>k=21.56163</b>	<b><math>\alpha_{95}=20.24</math></b>

**Tabla 9**

<b>TEOPNCZC4</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>
<b>T4-A</b>	353.0	35.1
<b>T4-B</b>	353.4	34.9
<b>T4-C</b>	354.2	38.1
<b>T4-D</b>	355.8	35.5
<b>T4-E</b>	354.9	32.5
<b>Promedio</b>	<b>354.3</b>	<b>35.2</b>
<b>R=4.99706</b>	<b>k=1360.462</b>	<b><math>\alpha_{95}=2.07</math></b>

**Tabla 10**

Los datos correspondientes al promedio de la declinación e inclinación, son graficados con la ayuda de una hoja de cálculo, en la curva de variación secular correspondiente a la región de Teotihuacan, que comprende desde el año 62 A.C. hasta 1999 (Hueda et al.,2004) como se muestra en las Figuras 15a y 15b. Una gráfica corresponde a la declinación y la otra a la inclinación.. El valor promedio está colocado tanto en la parte superior como en la parte inferior de cada gráfica con el objetivo de trazar una línea entre estos dos puntos para encontrar la intersección con los puntos de las fechas de la curva. La banda sombreada representa el ancho de la incertidumbre del dato. Las gráficas de la totalidad de las muestras se encuentran en el Apéndice 3.

Figura 15a

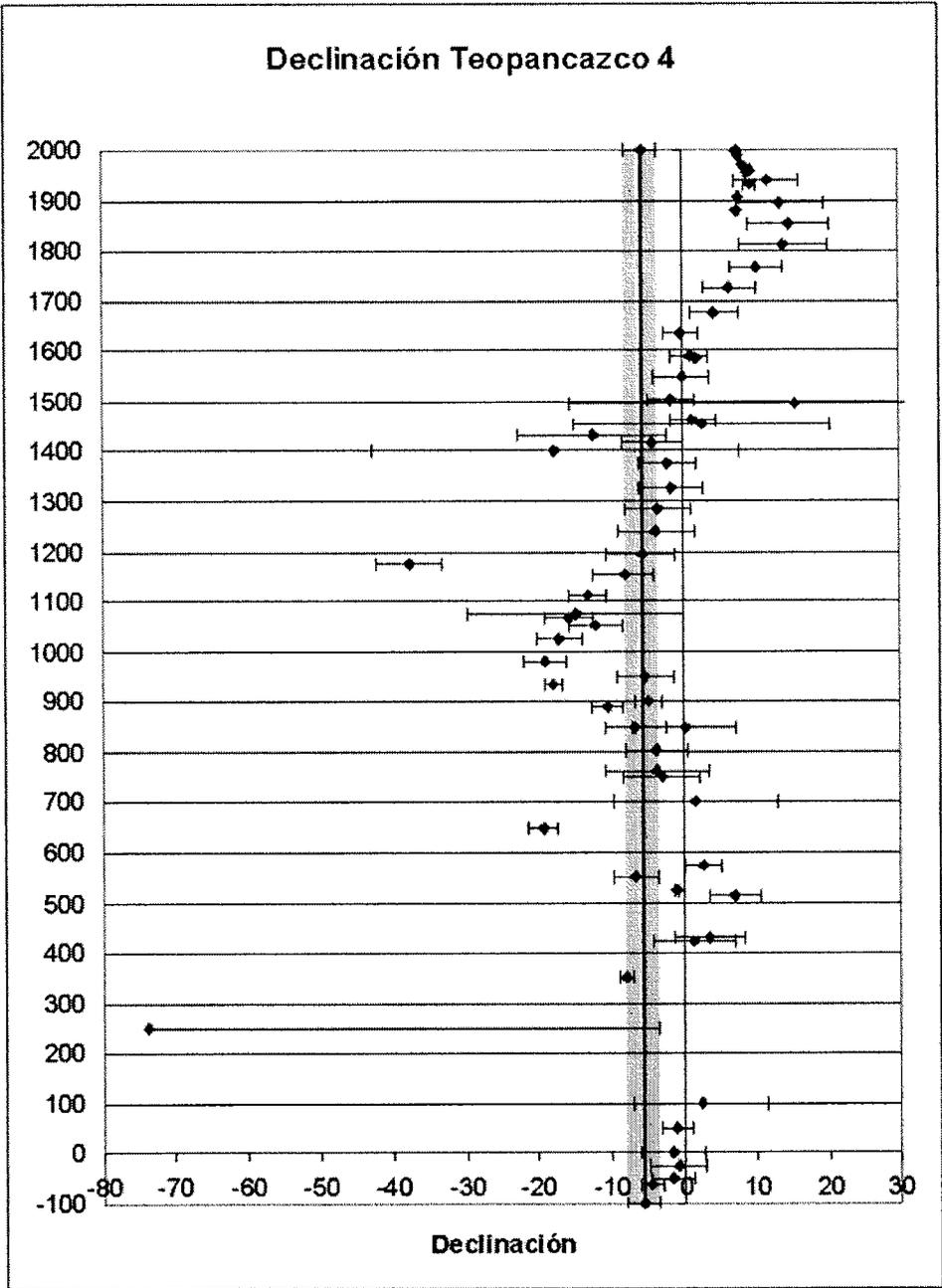
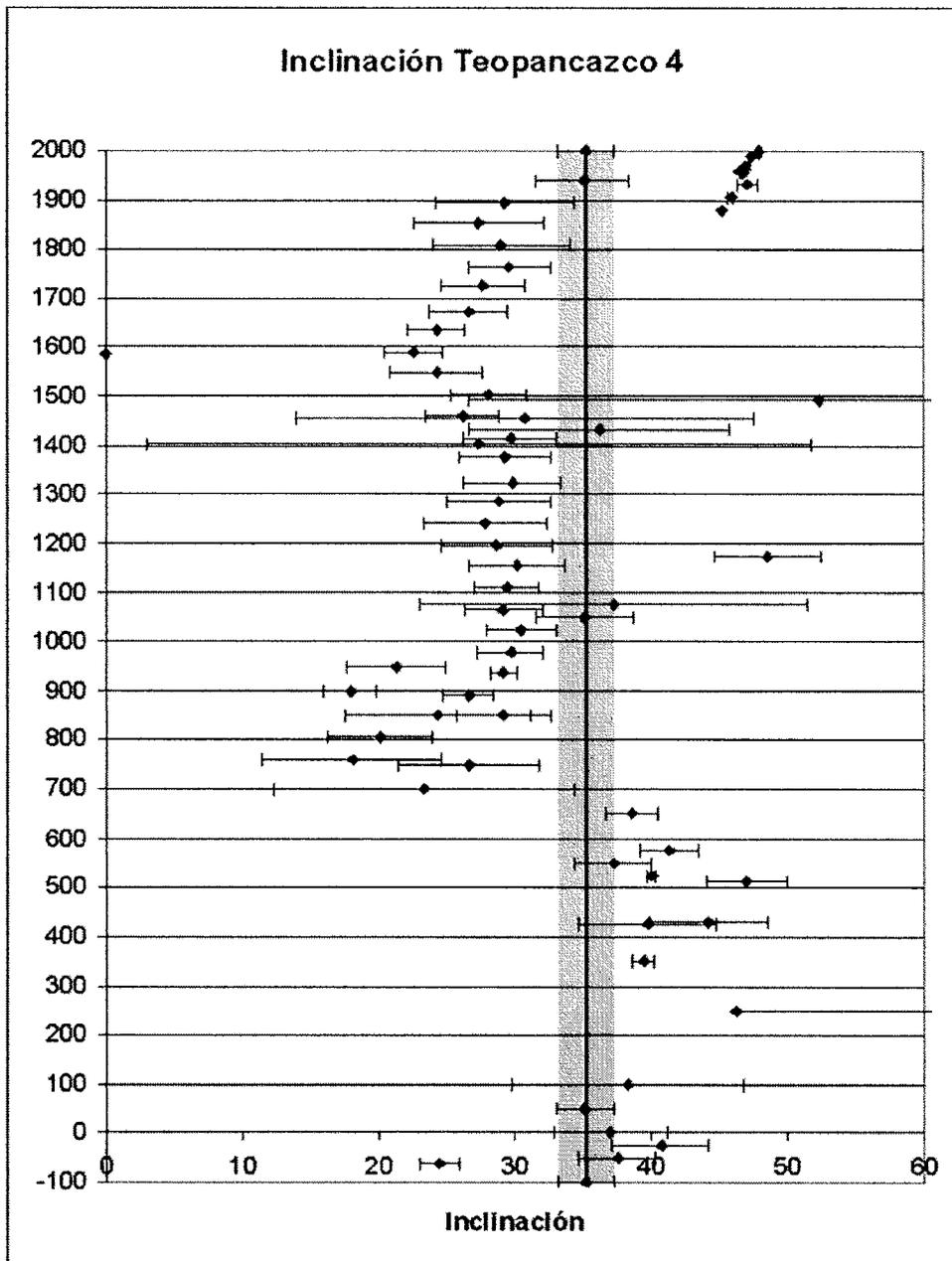


Figura 15b



RESULTADOS DE MUESTRAS DE TEOPANCAZCO Y XALLA  
NOVIEMBRE 2003

mta	localizacion	n	dec	inc	@95	Fechas por declinación	Fechas por inclinación
XA1	E369,N285	4	355.6	38.3	4.1	537,755,800,850,950,1200,1285,1400	0,100,425, <b>537</b> ,1075,1433
XA2	E370,N380	3	355	38	2.3	537,780,850,950,1200,1415	0,100,425, <b>537</b> ,1075,1433
XA3	E370,N378	3	4.4	41.8	11.9	430,1675	427,575
XA4	E369,N378	1	353.5	41.2		350,550,850,950,1200	425,575
XA5	E369,N380	1	356.3	35.1		537,761,800,900,1240	50,1050
XA6	E361,N378		----	----			
XA7	E361,N380	1	343.5	39.3		650,935,1025,1401	650
XA8	E361,N380	4	356.3	45.8	2.9	537,761,800,900,1240	250,513
XA9	E361,N380	8	355.1	42.6	2.1	62Ac,537,761,800,900,1240	25aC,427,575
X10	E317,N411		----	---			
X11	E317,N411		----	---			

**Tabla 11. Tabla de fechamientos para Xalla**

mta	localizacion	n	dec	inc	@95	Fechas por declinación	Fechas por inclinación
Tp1	E108,N464	6	353.9	41.4	8.28	350,550,850,950,1200,1424	350,425, <b>525,575</b>
Tp2	E108,N463	2	352.8	45.1	35.52	350,550,850,950,1200,1424	250,430, <b>519</b>
Tp3	E108,N462	2	346.9	31.5	103		
Tp4	Piso del templo	5	354.2	34.8	2.28	350,550,850,950,1200,1424	50,650,1050,1075

**Tabla 12. Tabla de fechamientos para Teopancazco**

En las tablas 11 y 12 se muestran el conjunto de fechas que fueron obtenidas por la intersección con las curvas maestras(Fig. 15a y 15b). Las que aparecen en negritas son las aceptadas por la Dra. Linda Manzanilla en base a posición estratigráfica de los pisos o de resultados de <sup>14</sup>C.

## 8. Conclusiones

En general las muestras de Xalla mostraron direcciones tendientes al origen (diagramas de Zijderveld) a excepción de las muestras de X6, X10 y X11. Estas últimas no mostraban evidencias de quemado y sus

RESULTADOS DE MUESTRAS DE TEOPANCAZCO Y XALLA  
NOVIEMBRE 2003

mta	localizacion	n	dec	inc	@95	Fechas por declinación	Fechas por inclinación
XA1	E369,N285	4	355.6	38.3	4.1	537,755,800,850,950,1200,1285,1400	0,100,425, <b>537</b> ,1075,1433
XA2	E370,N380	3	355	38	2.3	537,780,850,950,1200,1415	0,100,425, <b>537</b> ,1075,1433
XA3	E370,N378	3	4.4	41.8	11.9	430,1675	427,575
XA4	E369,N378	1	353.5	41.2		350,550,850,950,1200	425,575
XA5	E369,N380	1	356.3	35.1		537,761,800,900,1240	50,1050
XA6	E361,N378		----	----			
XA7	E361,N380	1	343.5	39.3		650,935,1025,1401	650
XA8	E361,N380	4	356.3	45.8	2.9	537,761,800,900,1240	250,513
XA9	E361,N380	8	355.1	42.6	2.1	62Ac,537,761,800,900,1240	25aC,427,575
X10	E317,N411		----	---			
X11	E317,N411		----	---			

**Tabla 11. Tabla de fechamientos para Xalla**

mta	localizacion	n	dec	inc	@95	Fechas por declinación	Fechas por inclinación
Tp1	E108,N464	6	353.9	41.4	8.28	350,550,850,950,1200,1424	350,425, <b>525,575</b>
Tp2	E108,N463	2	352.8	45.1	35.52	350,550,850,950,1200,1424	250,430, <b>519</b>
Tp3	E108,N462	2	346.9	31.5	103		
Tp4	Piso del templo	5	354.2	34.8	2.28	350,550,850,950,1200,1424	50,650,1050,1075

**Tabla 12. Tabla de fechamientos para Teopancazco**

En las tablas 11 y 12 se muestran el conjunto de fechas que fueron obtenidas por la intersección con las curvas maestras(Fig. 15a y 15b). Las que aparecen en negritas son las aceptadas por la Dra. Linda Manzanilla en base a posición estratigráfica de los pisos o de resultados de <sup>14</sup>C.

## 8. Conclusiones

En general las muestras de Xalla mostraron direcciones tendientes al origen (diagramas de Zijderveld) a excepción de las muestras de X6, X10 y X11. Estas últimas no mostraban evidencias de quemado y sus

bases o apisonados presentaban bloques de escoria gruesos, que podían haber afectado el registro de la MRN.

Las muestras X7 a X9 son muestras de muros con pinturas, en el caso de la muestra X7 sólo se cuenta con un espécimen por lo que no puede ser interpretada la fecha como válida. Las muestras X8 y X9 además de la pintura muestran evidencias de quemado por lo que su valor más aceptable es el de **537 d.C.** y no la fecha de su aplicación, pues es mayor la coercitividad de la señal de la quema.

En el apéndice1 se muestra la tabla de resultados anteriores donde se puede observar la consistencia de estos con las muestras de piso 1 quemados en ambas campañas (Oct. 2001 y Nov. 2003) de excavación de Xalla.

También en su mayoría las muestras de Teopancazco mostraron direcciones tendientes al origen, por lo que fue posible determinar una dirección característica. T1 y T2 no estaban quemadas y la primera mostró buen agrupamiento ( $\alpha_{95}$  menores a 10), no así T2 que presenta un gran  $\alpha_{95}$  y pocos especímenes. T4 muestra evidencias de quemado de ahí que registre la fecha del incendio **550 d.C.** y tenga un  $\alpha_{95}$  menor a 5.

Observamos que la mayoría de las fechas obtenidas para los estucos quemados en Xalla, al igual que en los resultados obtenidos por Hueda(2001), presentan una diferencia de alrededor de 15 años con los de Teopancazco. Lo anterior es interpretado por la Dra. Manzanilla como una diferencia real dada la ubicación de Xalla y Teopancazco(Manzanilla, 2003). El incendio que origino el abandono de la Ciudad fue un evento ritual y no se llevó a cabo en los suburbios de la misma (Teopancazco) hasta años después.

## BIBLIOGRAFIA

- Aitken, M.J., 1964. *Archaeomagnetic results: Some geophysical implications* Archaeometry vol. 7., pp. 43-50
- Butler, R. 1992. *Paleomagnetism. Magnetic domains to Geologic Terranes*. Ed. Blackwell Scientific Publications. Boston. p. 319
- Campbell, W. Hall, 1997. *Introduction to geomagnetic field*. Cambridge University. pp. 1-17, 49-61.
- Chiari, G. and R. Lanza, 1999. *Remanent magnetization of mural paintings from the Bibliotheca Apostolica (Vatican, Rome)*, Journal of Applied Geophysics, vol. 41, pp.137-143.
- Chiari, G. and R. Lanza, 1997. *Pictorial remanent magnetization as an indicator of secular variation of the Earth's magnetic field*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol. 101, pp. 79-83.
- Daly, L. & M. Le Goff, 1996. *An updated and homogeneous world secular variation data base. 1. Smoothing of the archaeomagnetic results*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol. 93, pp. 159-190.
- Hueda, Y., A.M. Soler-Arechalde, J. Urrutia-Fucugauchi, L. Barba, L. Manzanilla, M. Rebolledo-Vieyra & A. Gogutchashvili, 2004. *Archaeomagnetic studies in central México-dating of Mesoamerican lime-plasters*. Physics of the Earth and Planetary Interiors 147, pp. 269-283.
- Hueda, Y. 2000. *Fechamiento arqueomagnético de estuco de los sitios de Teopancazco, Teotihuacan y Templo Mayor, Tenochtitlan*. Tesis de Licenciatura en Arqueología, ENAH. 128 pp.
- Latham, A.G., H.P. Schwarz & D.C. Ford. 1986. *The paleomagnetism and U-Th dating of Mexican stalagmite*. DASD2. Earth and planetary Science Letters.,vol. 79. pp. 195-207.
- Manzanilla, L.2003, *Teopancazco: un conjunto residencial teotihuacano*, Arqueología Mexicana, vol. XI, núm. 64, pp. 50-53.
- Manzanilla, L. & L. López Luján, 2001. *Exploraciones en un posible palacio de Teotihuacan: El proyecto Xalla (2000-2001)*. Mexican, Aktuelle informationen und studien zu Mesoamerika. Vol. 23, No. 3
- McElhinny, M.W. & McFadden, P.L. 2000. *Paleomagnetism. Continents and Oceans*. Ed. Academic Press. p. 386

- Merrill, R.T., M.W. McElhinny & McFadden, P.L. 1998. *The magnetic field of the Earth*. Ed. Academic Press. p.531
- Rodríguez, Ma. Gpe., 2003. *Análisis y fechamiento arqueomagnético de estucos de zonas habitacionales de Teotihuacan(Xalla) y Templo Mayor*. Tesis de licenciatura en Física, UNAM. pp. 64
- Tarling, D. H., *Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archaeology*. Ed. Chapman and Hall, 1983, pp. 15-31, 117-130.
- Urrutia-Fucugauchi, J. 1996. *Paleomagnetic study of the Xitle-Pedregal de San Angel lava flow, southern Basin of Mexico*, vol. 97, pp.177-196.
- Wolfman, D. 1990. *Mesoamerican chronology and archaeomagnetic dating AD 1-1200*. Archaeomagnetic dating. EGHMY, J.L. & R.S. Steinberg. University of Arizona Press, Tucson.
- Wolfman, D. 1973. *A re-evaluation of Mesoamerican chronology: AD1-1200*. Phd thesis. Colorado University, USA.

**Apéndice 1**

	Mtas Oct 2001		Ident LINDIA M	n	DEC	INC	α <sub>95</sub>	K	Fechas dec	Fechas inc
Xa1	E 4 C 1 N349 E331	Piso1 nq	32034	7	341.3	40.8	6.56	26.24	935 1025 1400	-25, 425-430 513, 525-575, 650 900
Xa2	E 4 C 1 N347 E339	Piso1 q	32035	8	354.8	46.1	7.12	75.67	550, 761, 805, 950, 1195, 1415	250, 513, 1175, 1907
Xa3	E 4 C 1 N348 E339	Piso1 q	32036	7	7.5	33.4	12.73	15.34	513, 1880	425, 650-700, 1025-1050
Xa4	E 4 C 1			9	359.3	38.8	5.91	49.46	425,525,700,850,1460	100, 350, 425, 550-575, 650, 1075
Xa5	E 4 C 1 N335 E333	Piso1 nq		10	356.8	34.2	5.93	56.57	525-550,750-800,1240	350,425,1050,1433
Xa6	E 4 C 1 N346 E333	Piso1 nq		9	332.6	38.7	8.29	25.27	100, 350, 425, 650	100, 350, 425, 650
Xa7	E 2 C 3 N352 E397	Piso1 nq	32951	8	336.5	29	13.36	11.99		850, 935, 1065
Xa8	E 2 C 1 N349 E397	Piso1 nq	32952							
Xa9	E 2 C 3 N344 E399	Muro Sur								
Xa10	E9 Edif 1 N350 E368	Piso1 nq	32216							
Xa11	E9 Edif 2 N350 E368	Piso2 rojo	32217	4	47	39.3	20.42	13.91		350, 425, 520 650, 900
Xa12	E9 Edif 3 N350 E363	Piso3	32218	6	336.8	48.4	20.1	8.06		1175
Xa13	E9 Edif 4 N356 E370	Piso4	32221	4	350	66.2	28.93	7.424	350, 890, 1155	
Xa14	E9 Edif 4 N354 E362	Piso pza Edif.roj		6	1.8	51.1	19.42	12.85	100, 425, 575, 1454	210, 510, 1175, 1494
Xa15	E9 plaza1 Edif5 N346 E359	Piso 1		6	359.3	41.4	29.09	7.353	425,525,700,850,1460	100,425, 575,650, 900

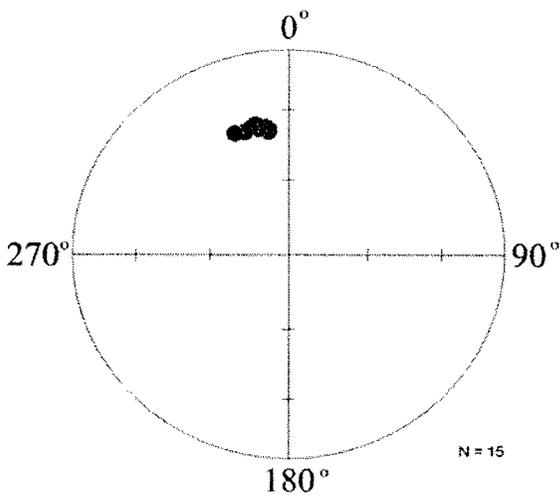
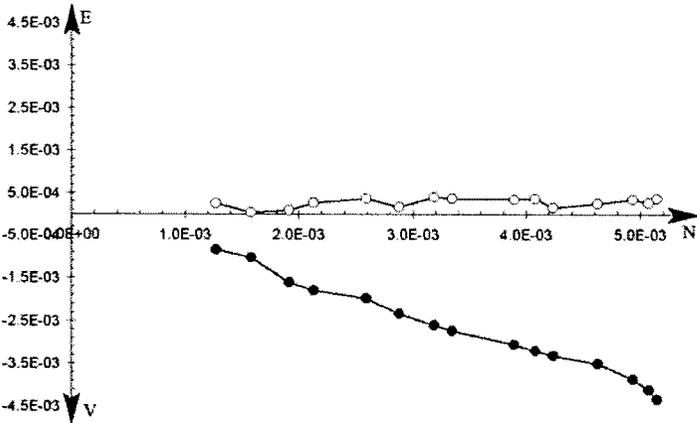
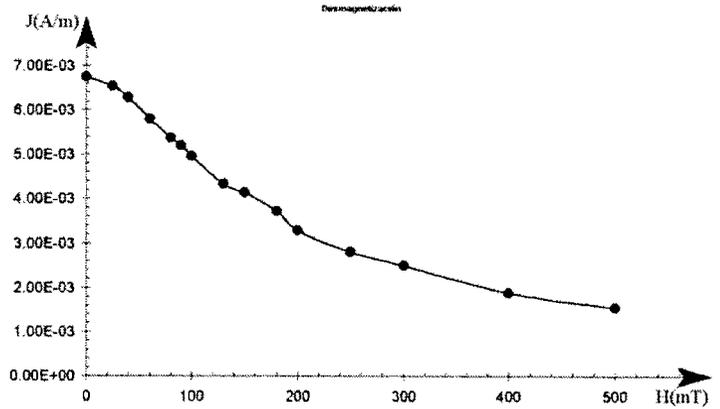
	Mtas Nov 2003									
X1	E1 N385 E369	Piso 1 nq		4	355.5	38.4	3.95	541.4	3.99	0.100,425,537,1075,1433
X2	E1 N380 E370	Piso 1 nq		3	355	38	2.3	2960	2.99	0.100,425,537,1075,1433
X3	E1 N378 E370	Piso 1 nq		3	4.4	41.8	11.9	108.2	2.982	427,575
X4	E1 N378 E369	Piso 1 nq		1	353.5	41.2				425,575
X5	E1 N380 E369	Piso 1 nq		1	356.3	35.1				50,1050
X6	N361 E378	muros rojos								
X7	N380 E361	muros rojos			343.5	39.3				650
X8	N380 E361	muros rojos		4	356.2	45.8	2.89	1006.3	3.997	250,513
X9	N380 E361	muros rojos		8	355.1	42.6	2.1	699.51	7.989	25aC,427,575
X10	E12 C1 N411 E317									
X11	E12 C1 N411 E317									

	Mías Nov 1999		n	DEC	INC	$\alpha_{95}$	K	R	FECHAS POR DEC	FECHAS POR INC
Tp2	E1 C206 P13 N458 E91		1	351.7	34					
Tp6	E1 C25 N440 E90		5	359.76	33.77	18.44	18.1628	4.7797		
Tp3	E1C14 N435 E87		20	4.0	36.7	3.51	19.78	87.101		
Tp7	E1C53 P1 N464 E108		5	353.9	41.1	32.08	4.5917	4.12		
Tp8	E1C53 P1 N464E107		4	356.83	36.92	2.17	1785.824	3.9983		

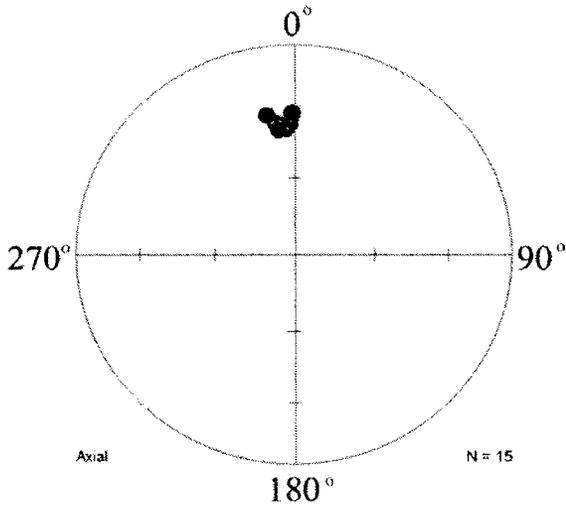
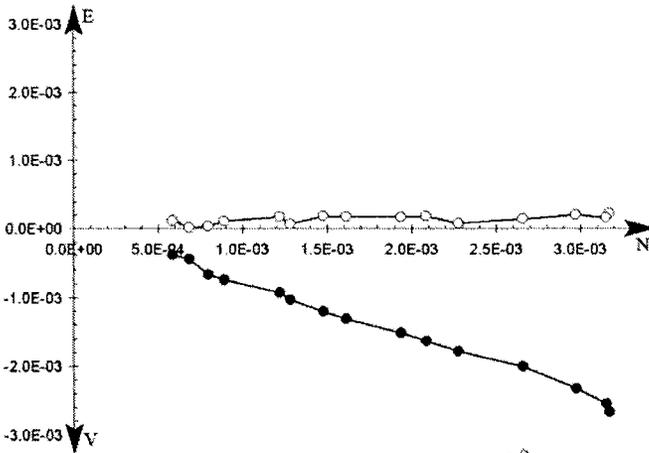
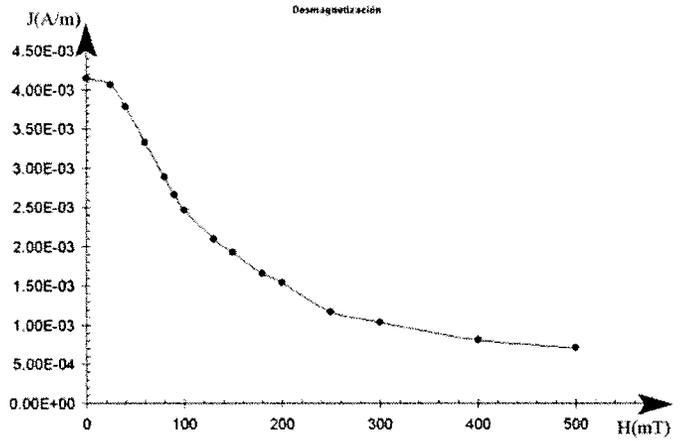
	Mías Nov 2003		n	DEC	INC	$\alpha_{95}$	K	R	FECHAS POR DEC	FECHAS POR INC
Te1	Cuarto 154 - 160	Piso 2	6	353.9	41.4	8.28	66.418	5.924	350,350,850,950,1200,1424	350,425,525,575
Te2	Cuarto 153 a,b,c E108 N464	Piso 2	2	352.8	45.1	35.52	51.538	1.980	350,550,850,950,1200,1424	250,430,519
Te2	Cuarto 153 d,e E108 N463	Piso 2								
Te3	Cuarto 153 E108 N462	Piso 2								
Te 4	Piso del Templo	Piso 1 nq	5	354.2	34.8	4.996	1122.5	2.28	350,550,850,950,1200,1424	50,650,1050,1075

Apéndice 2

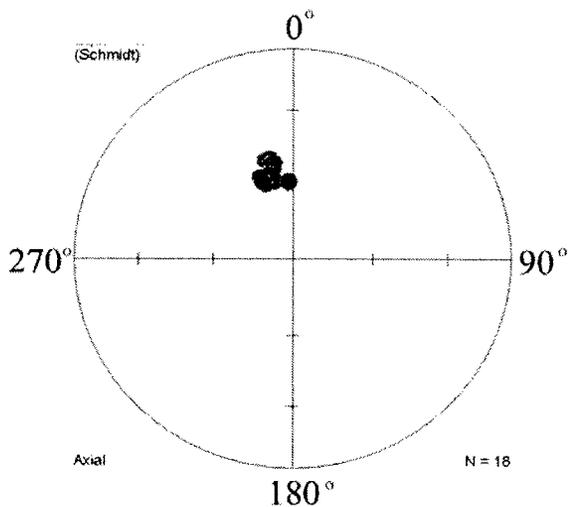
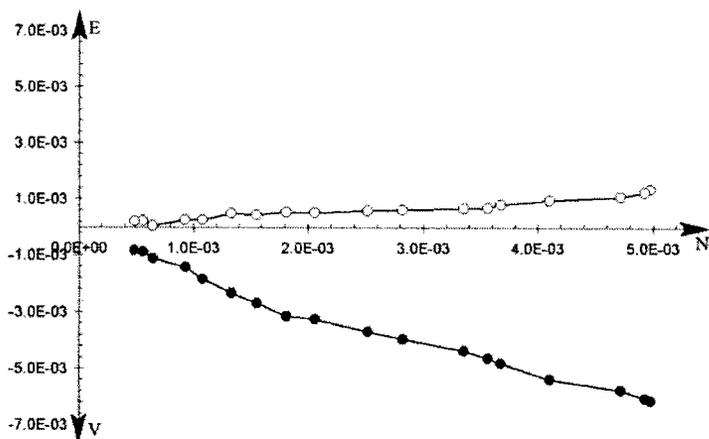
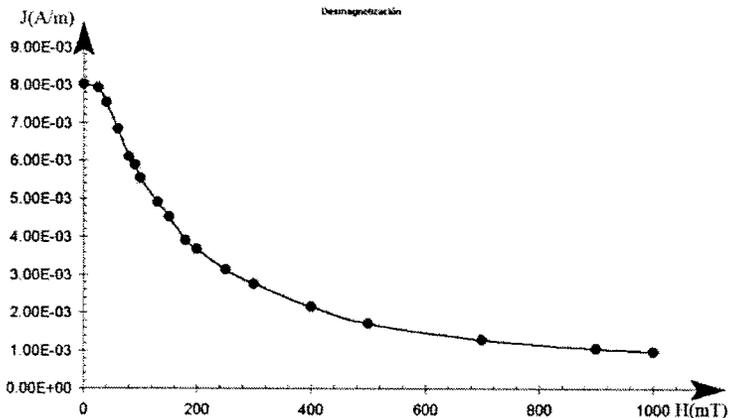
T1-A



T1-B

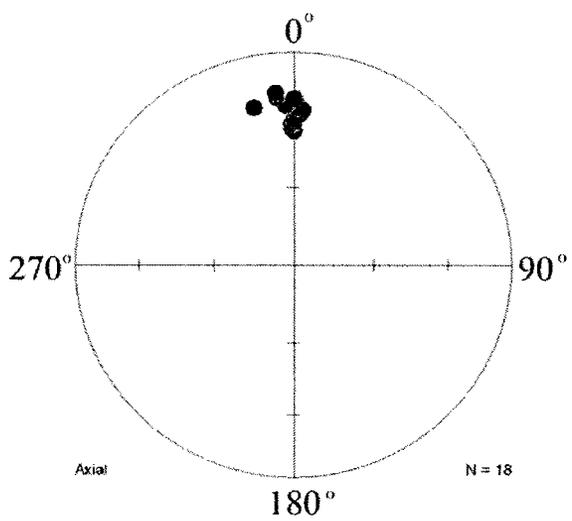
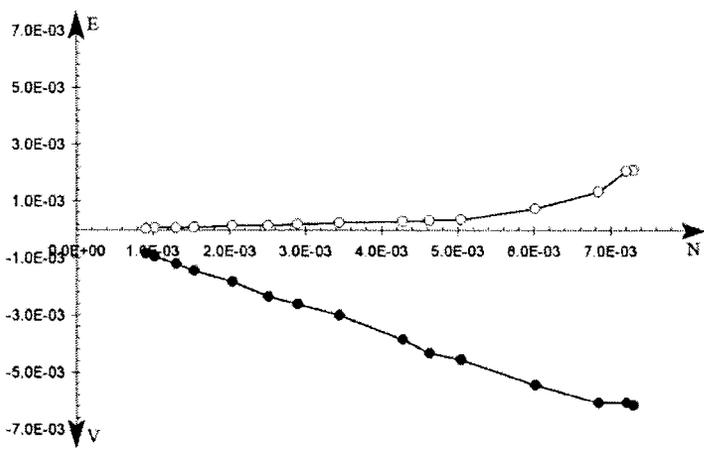
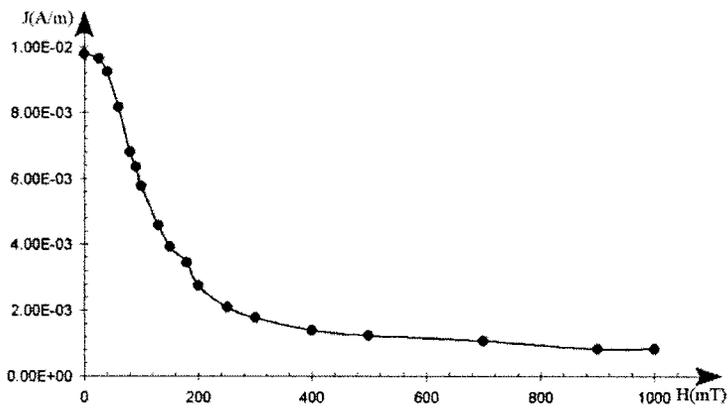


T1-C

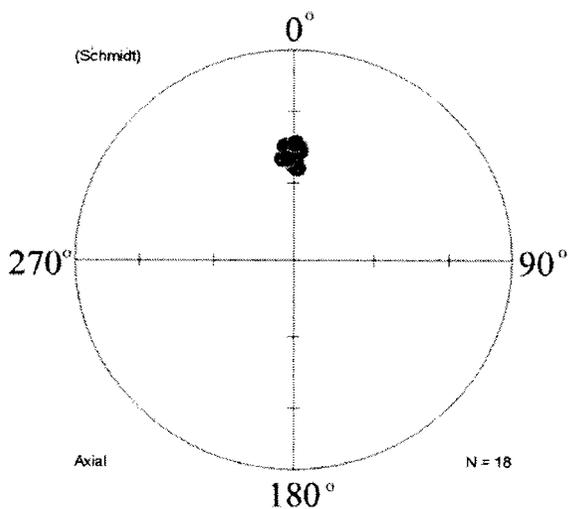
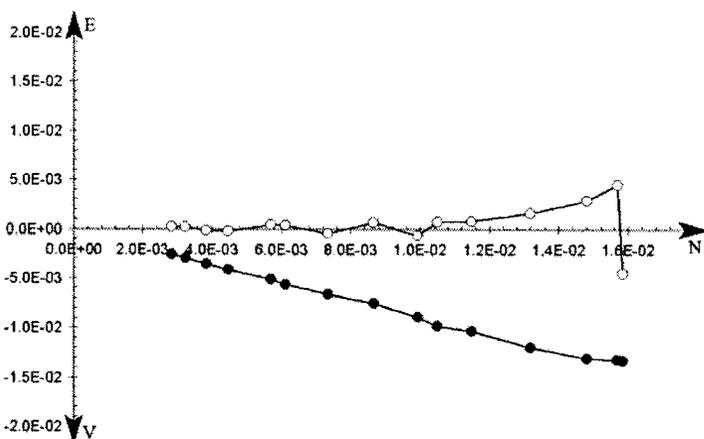
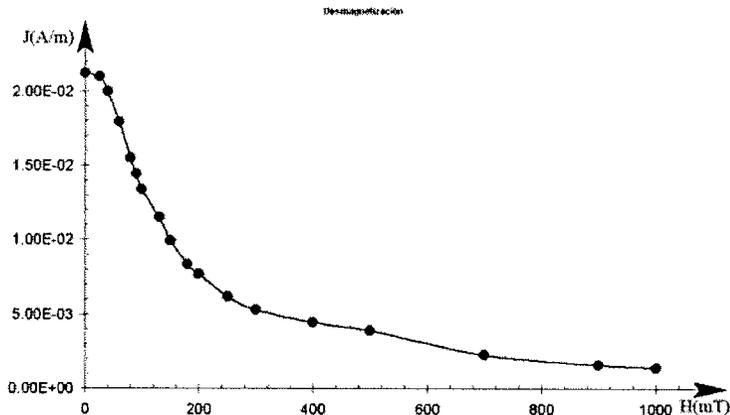


T1-D

Desmagnetización

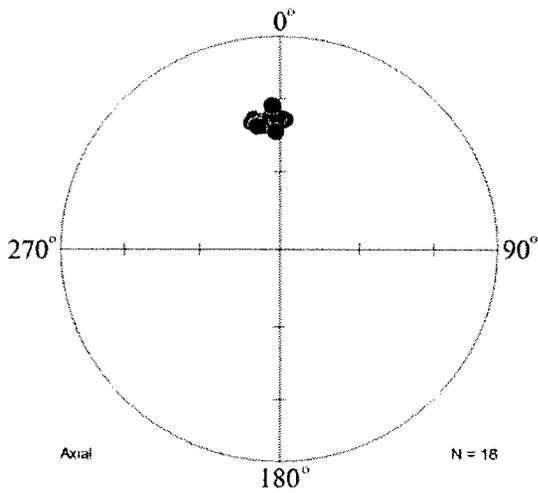
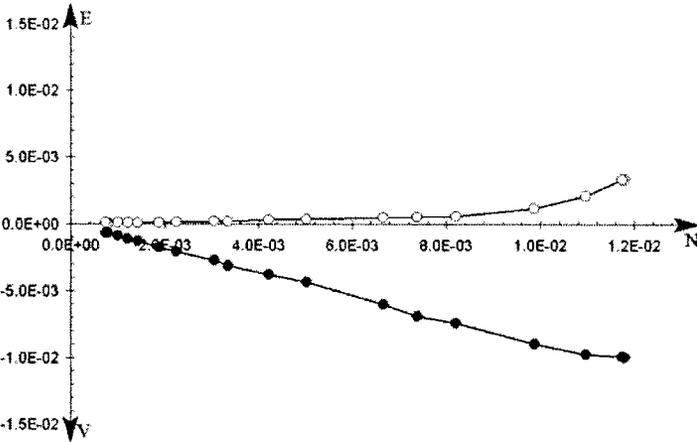
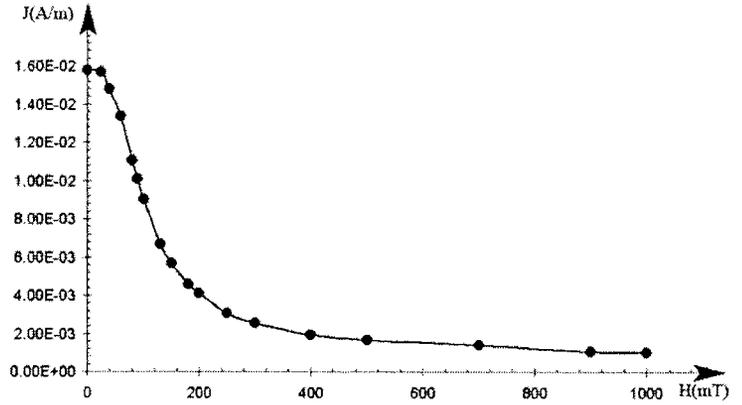


T1-E



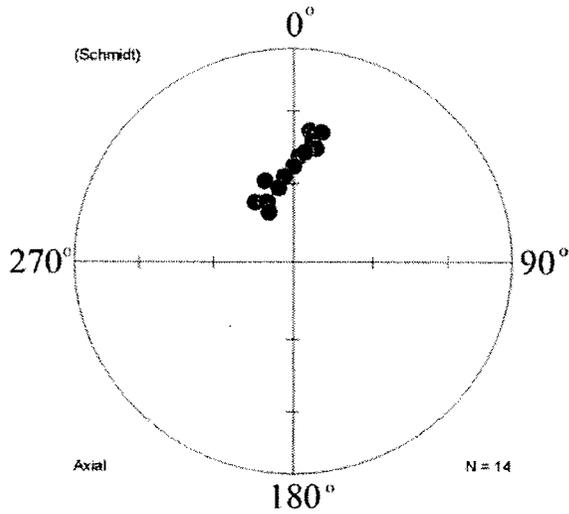
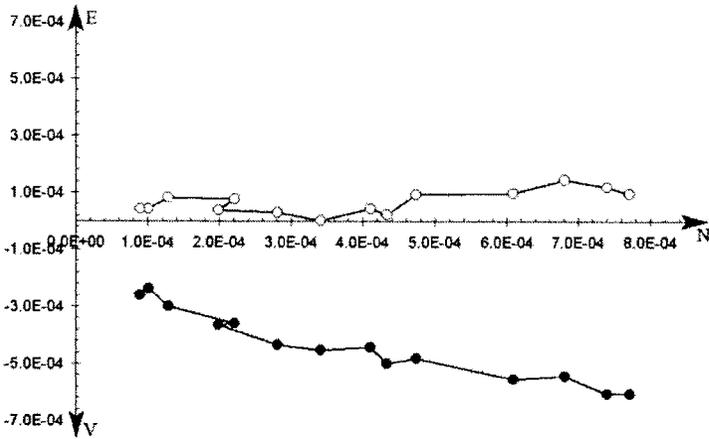
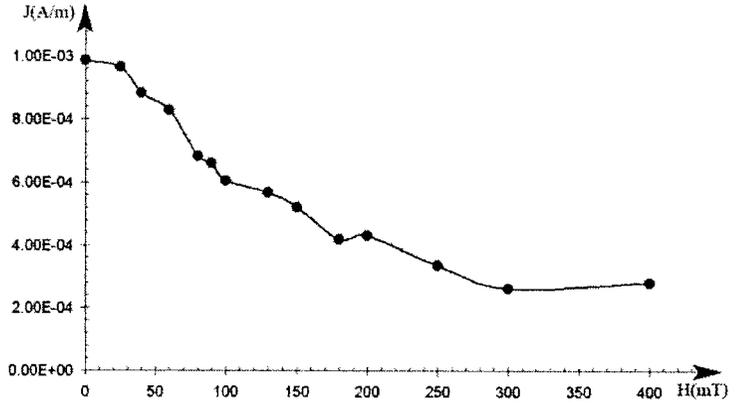
T1-F

Desmagnetización

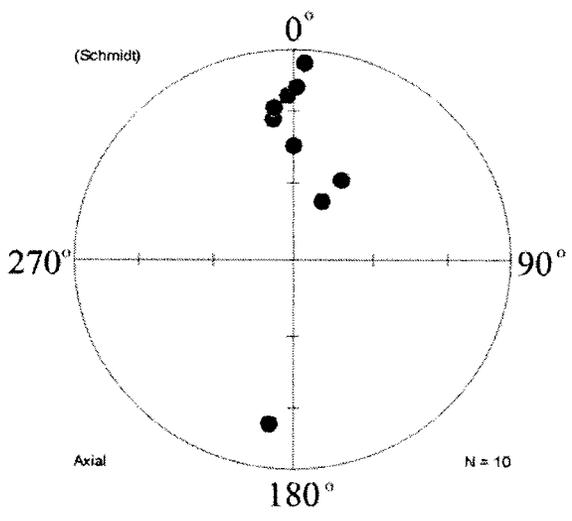
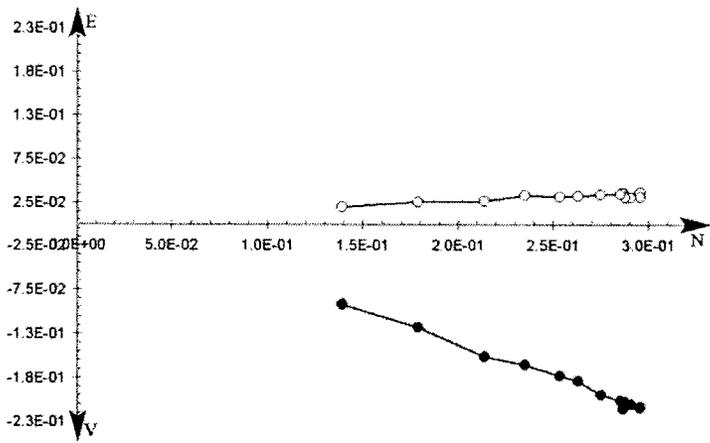
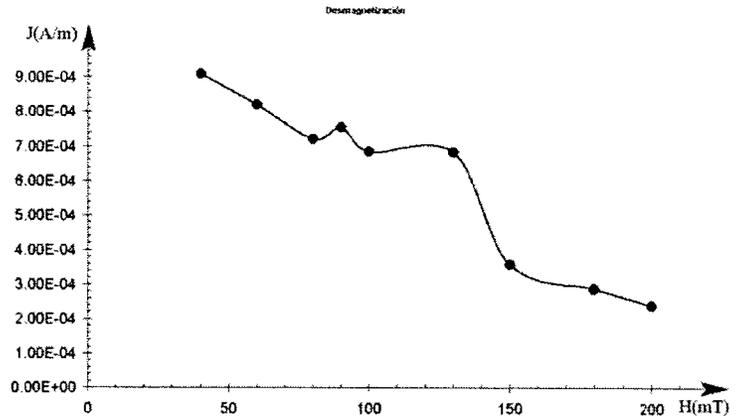


T2-A

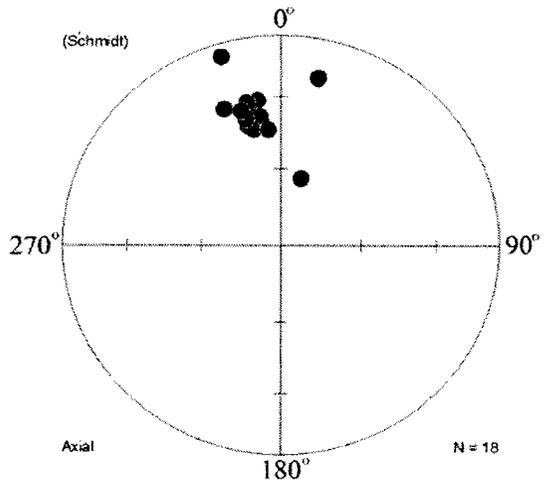
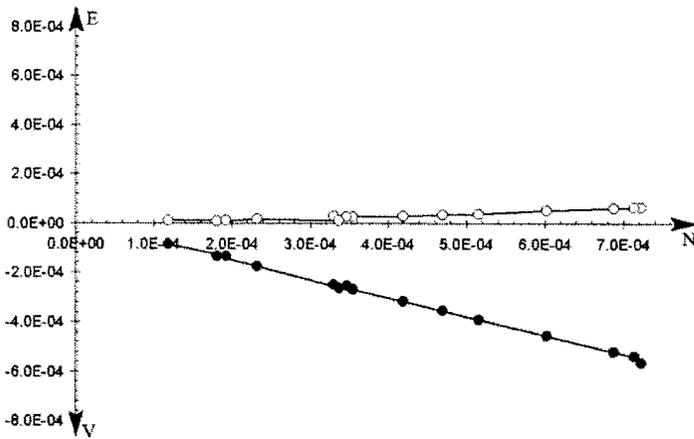
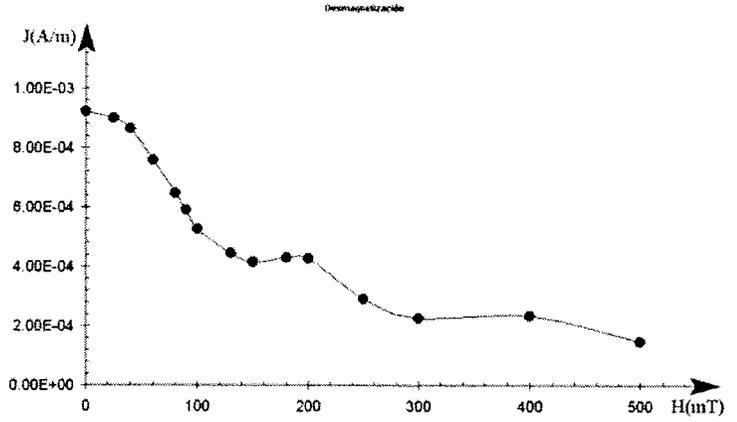
Desmagnetización



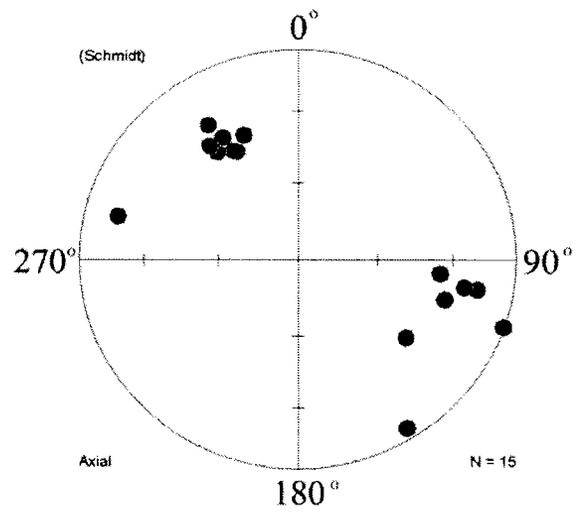
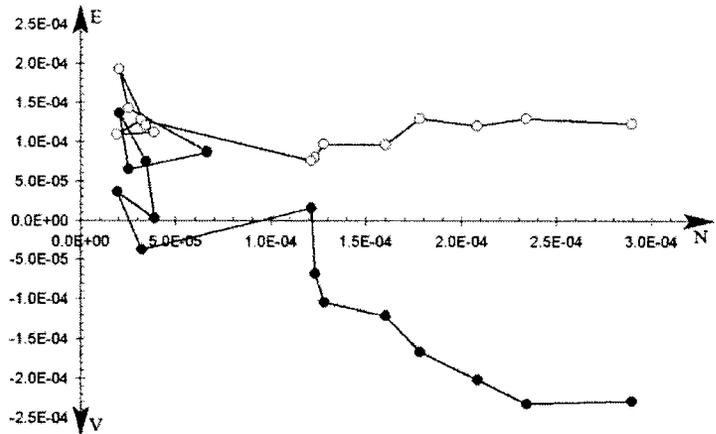
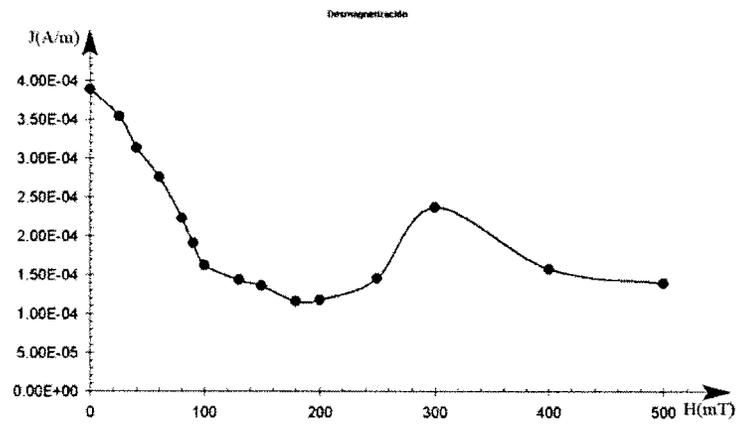
T2-B



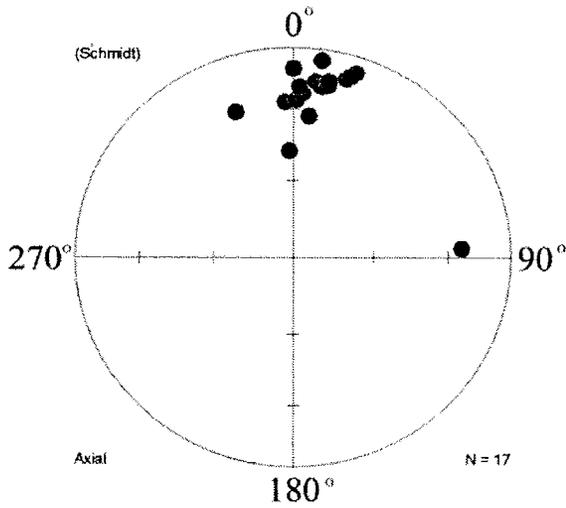
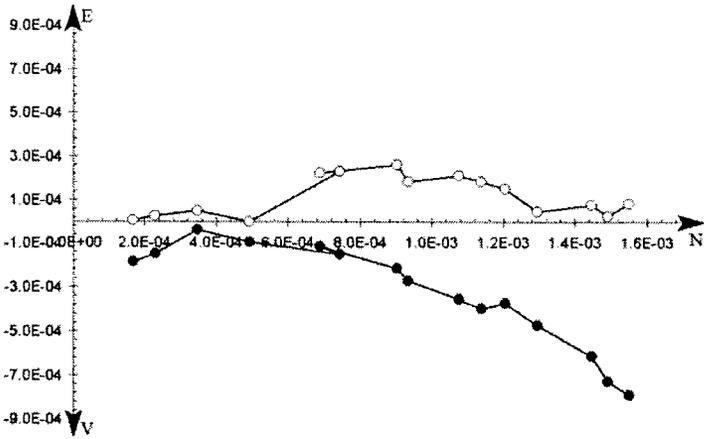
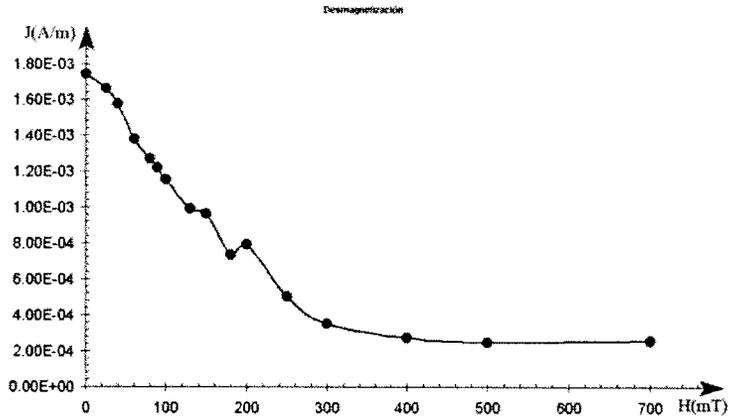
T2-C



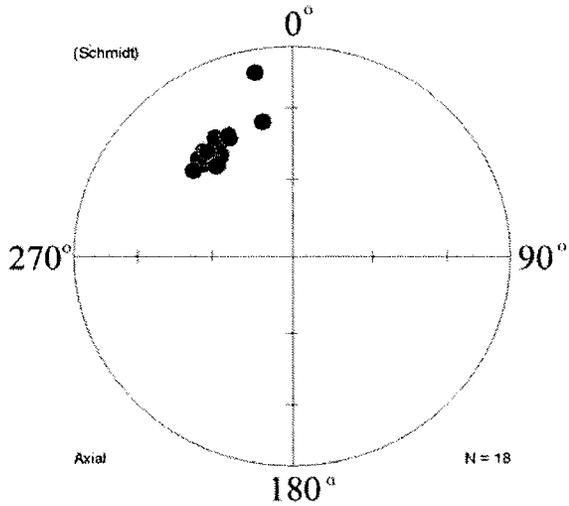
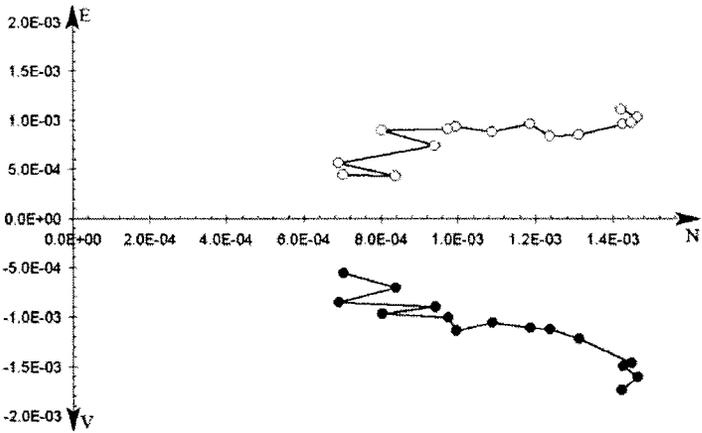
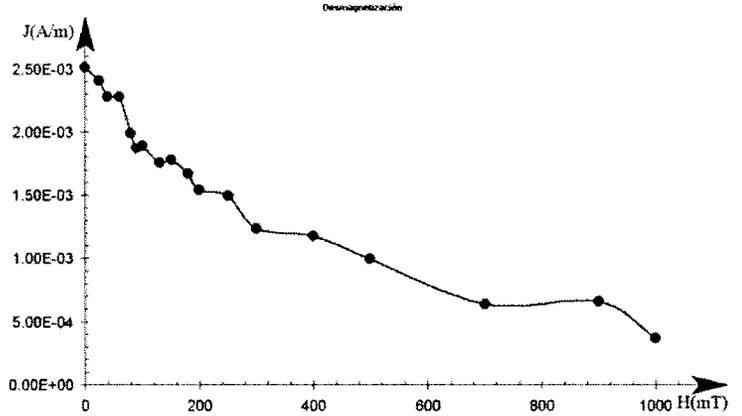
T2-D



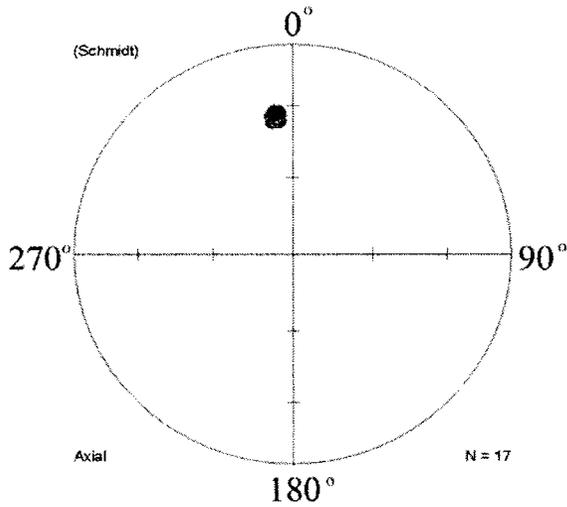
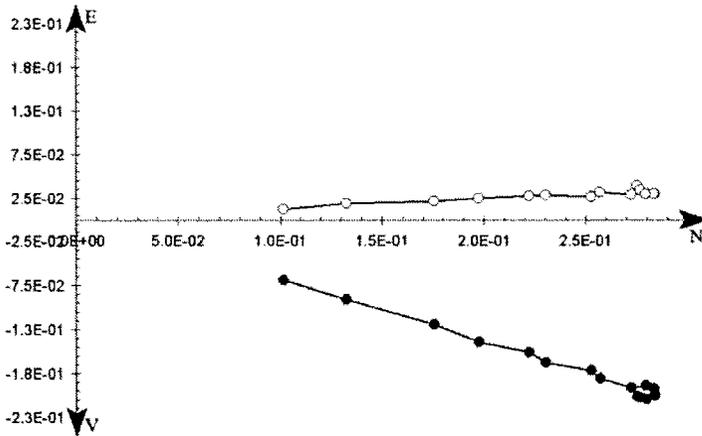
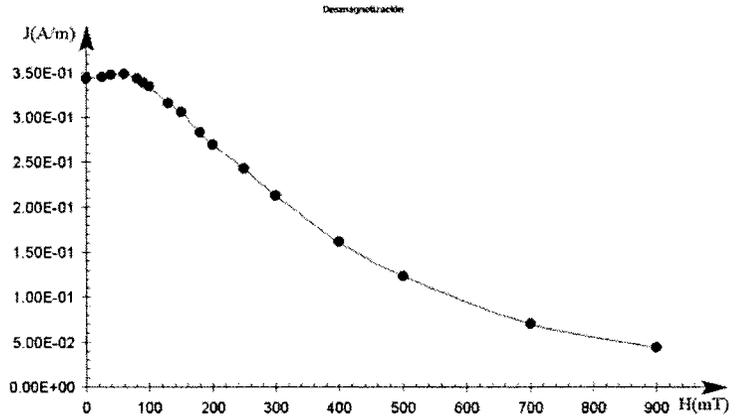
T3-A



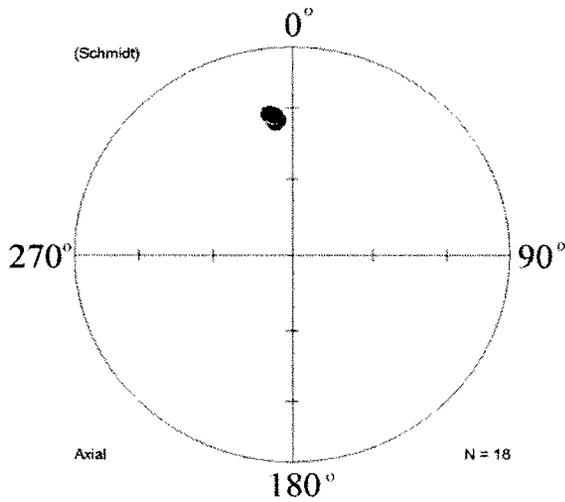
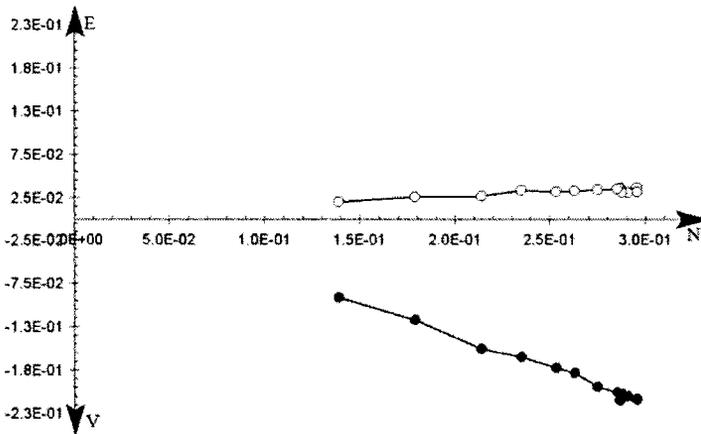
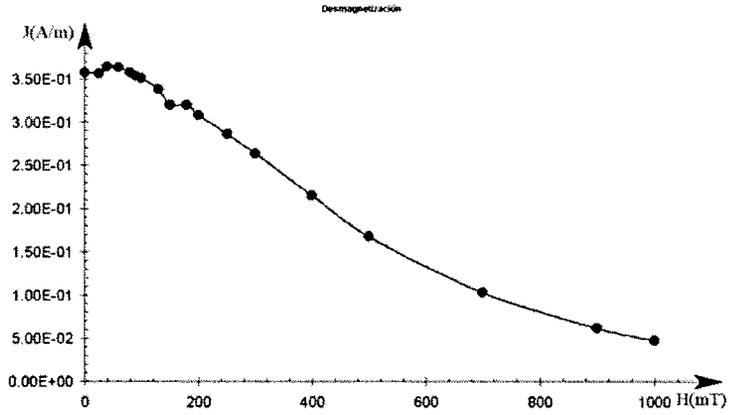
T3-C



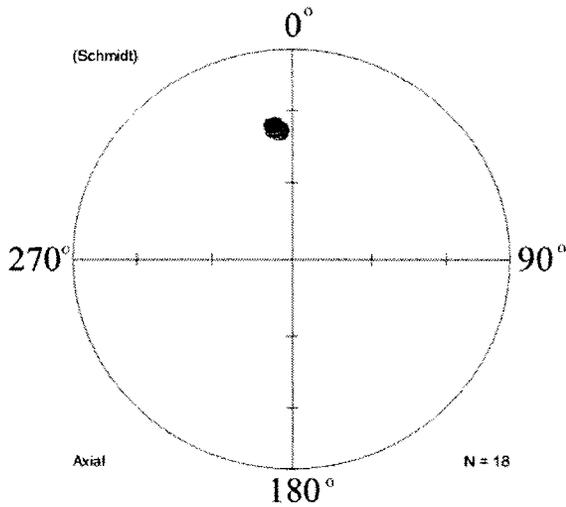
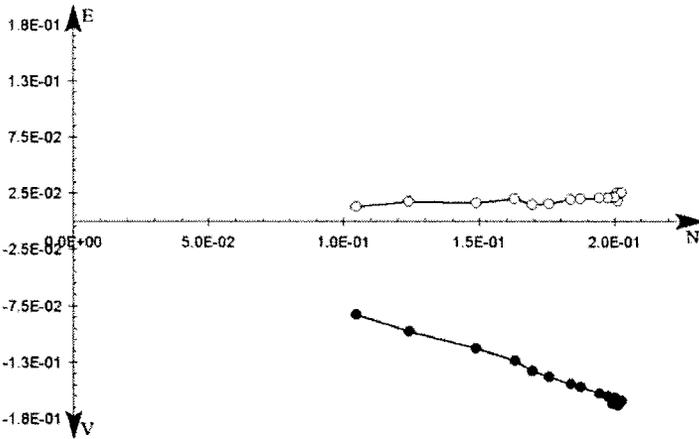
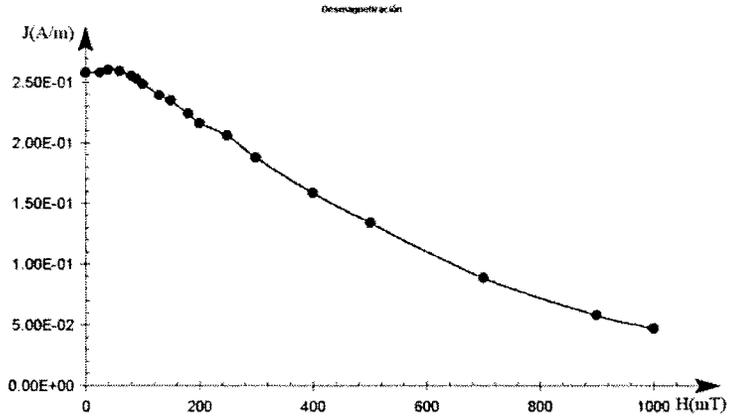
T4-A



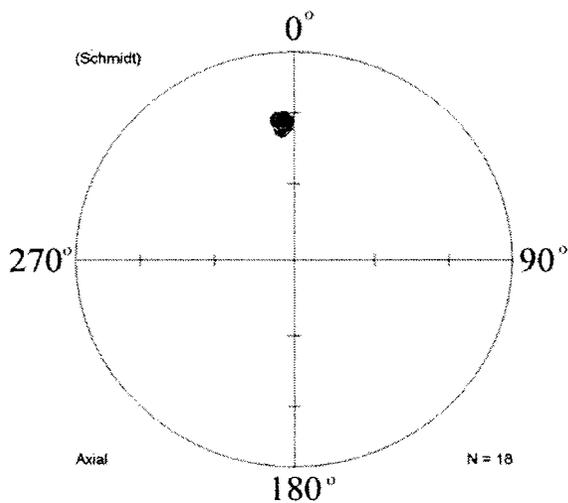
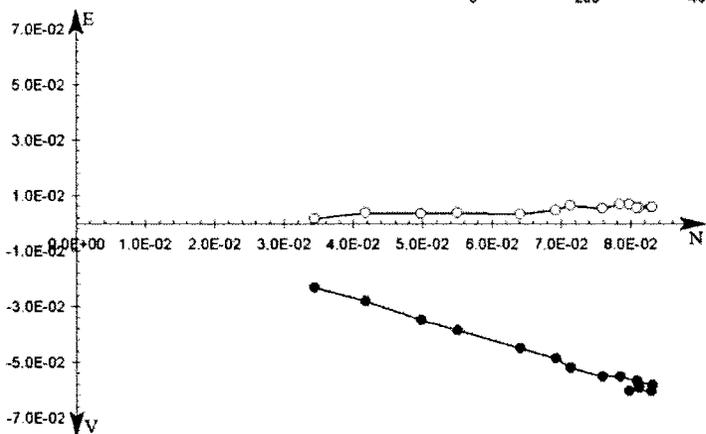
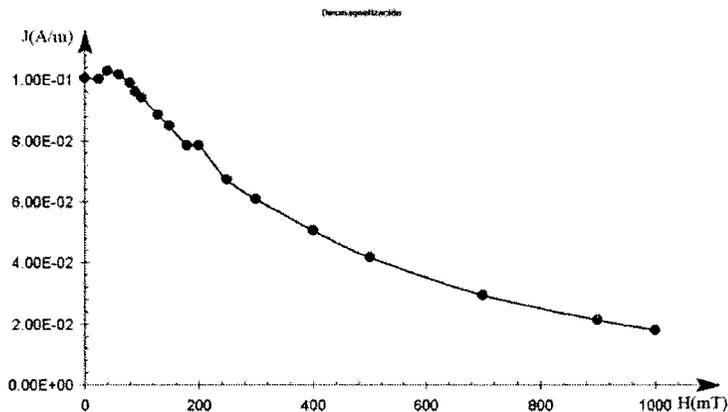
T4-B



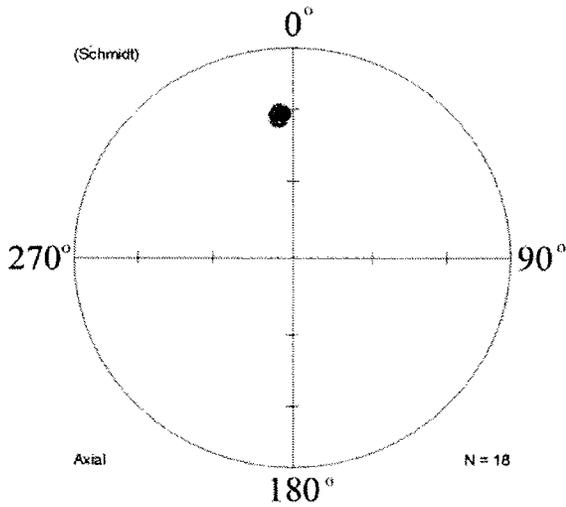
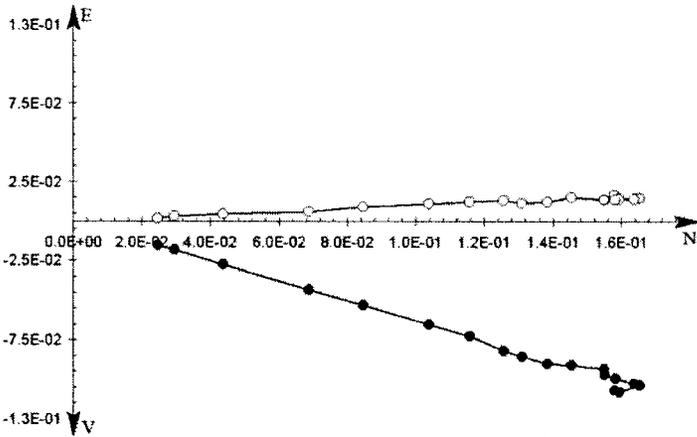
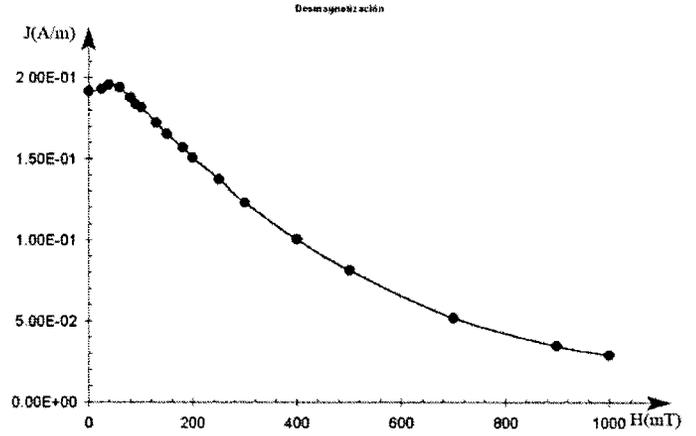
T4-C



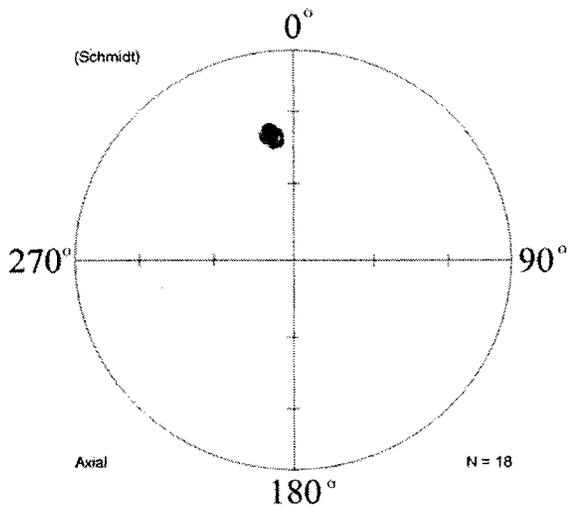
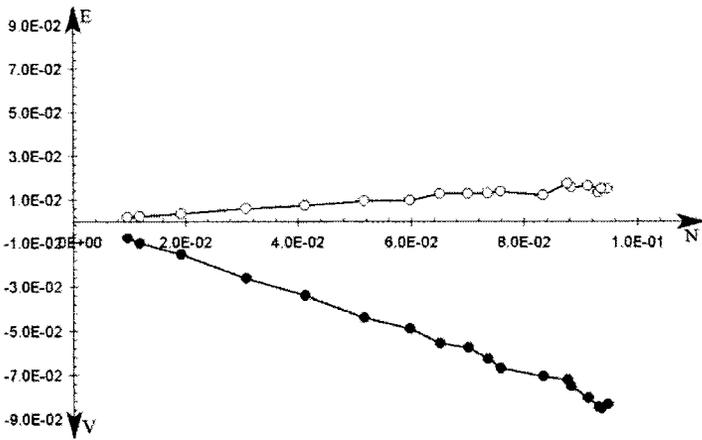
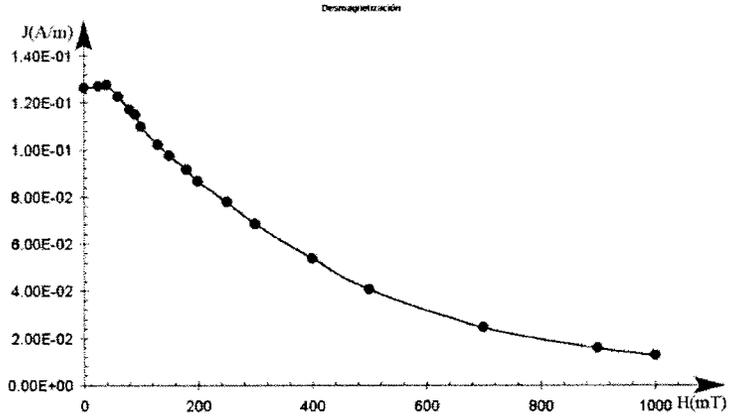
T4-D



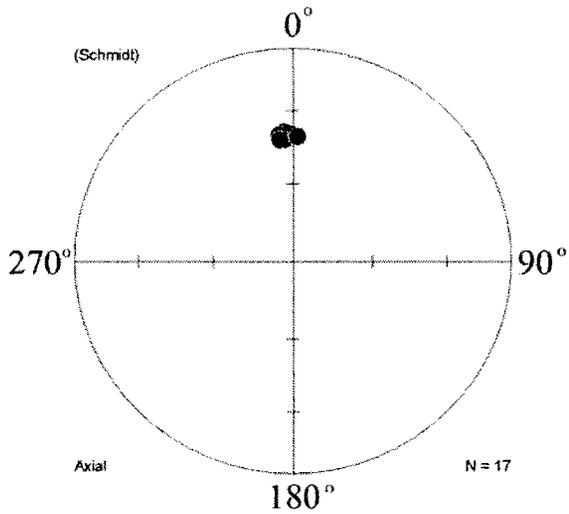
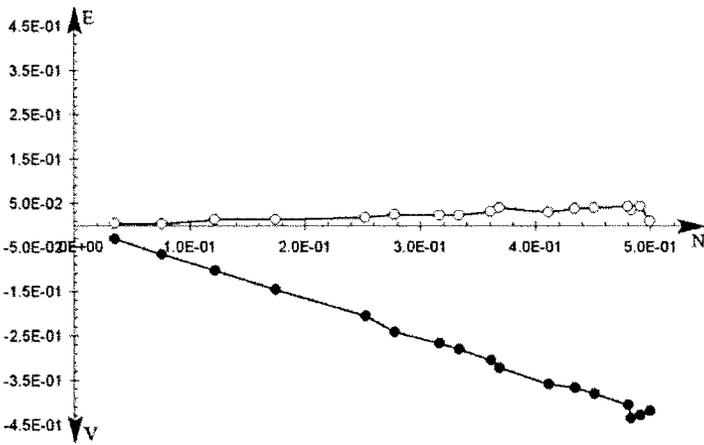
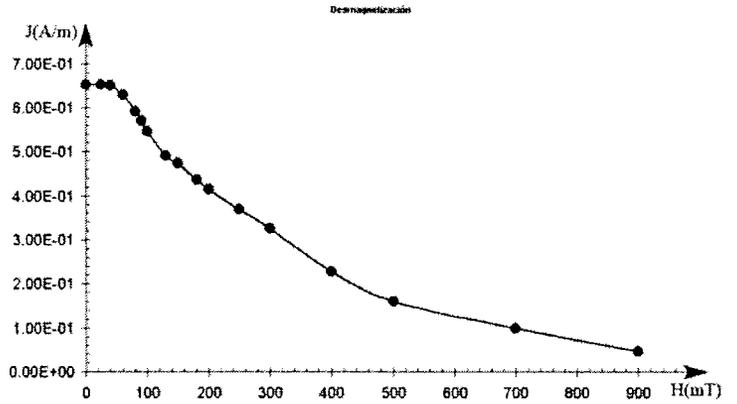
T4-E



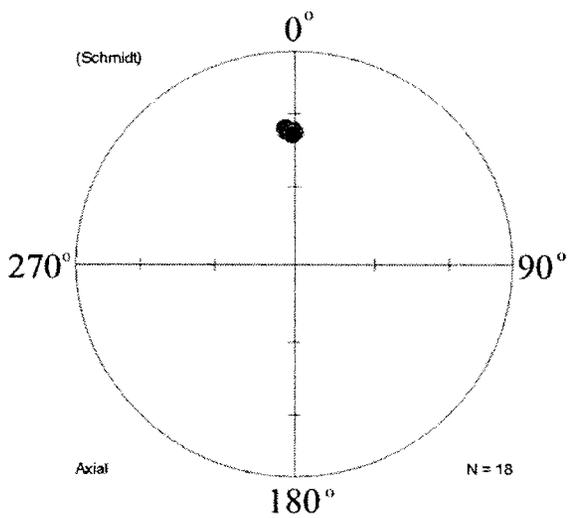
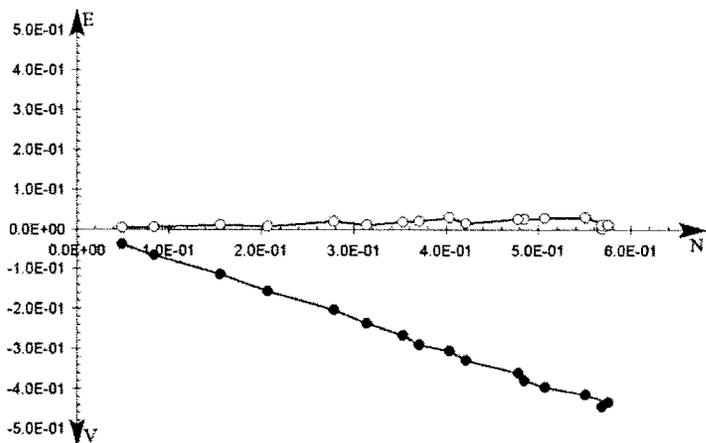
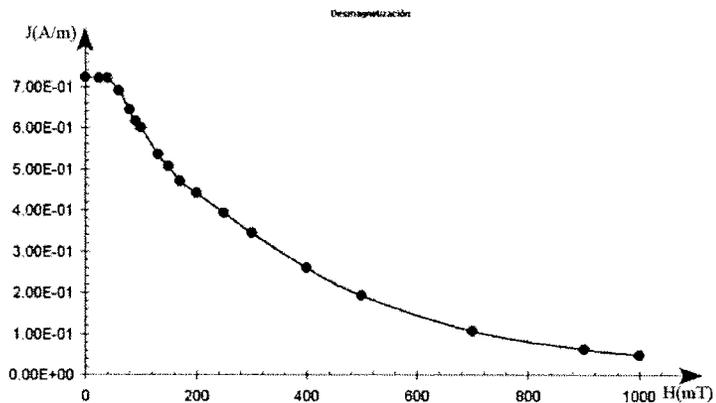
X1-A



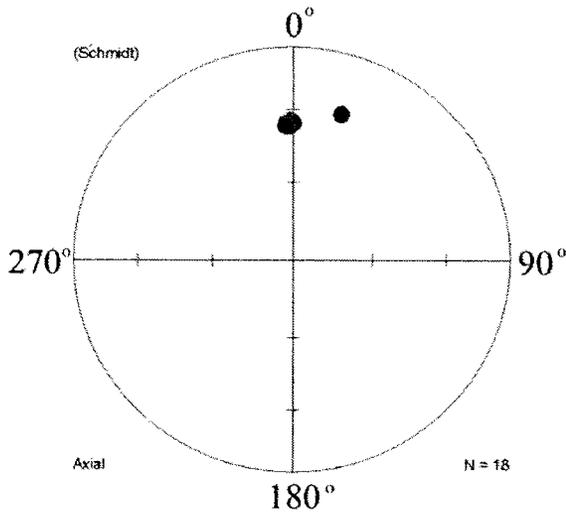
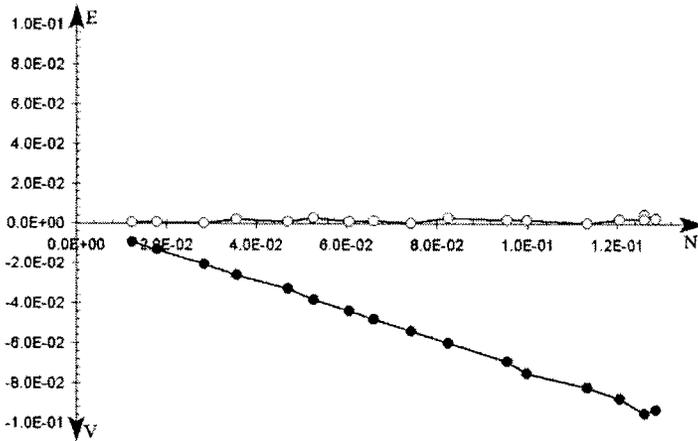
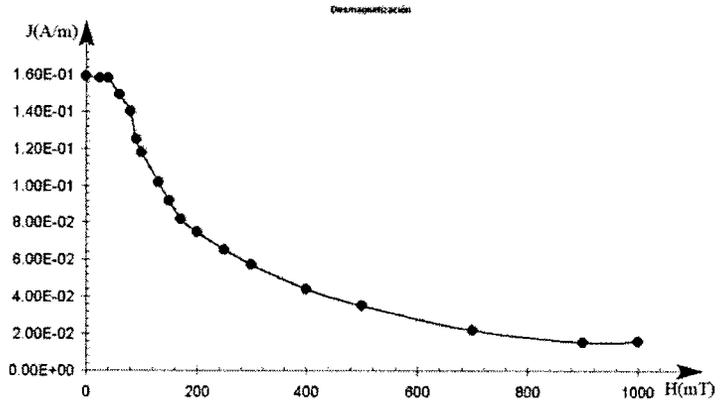
X1-B



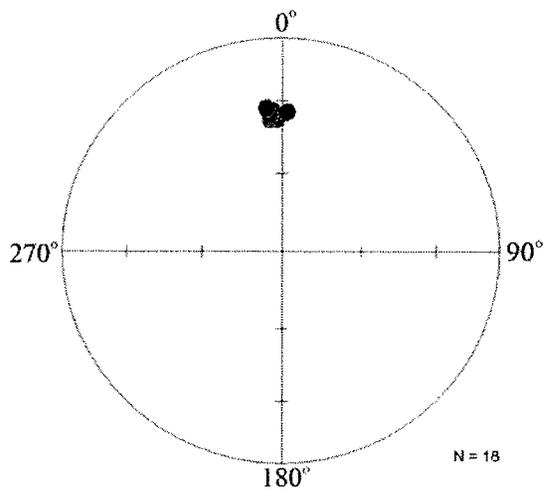
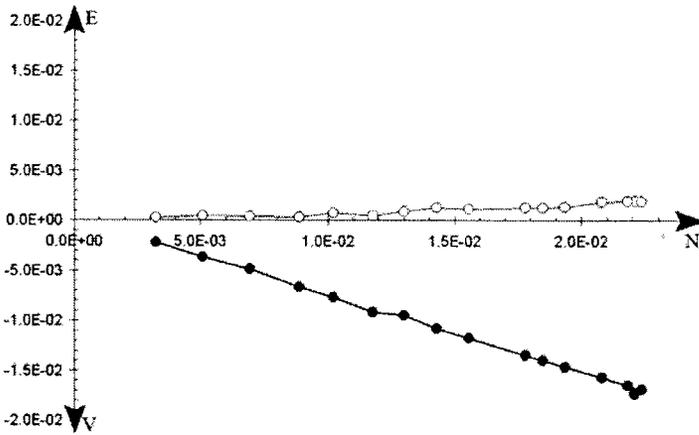
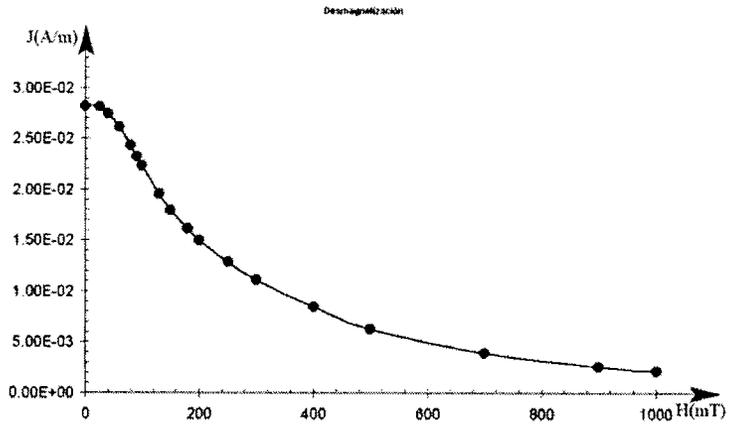
X1-C



X1-D

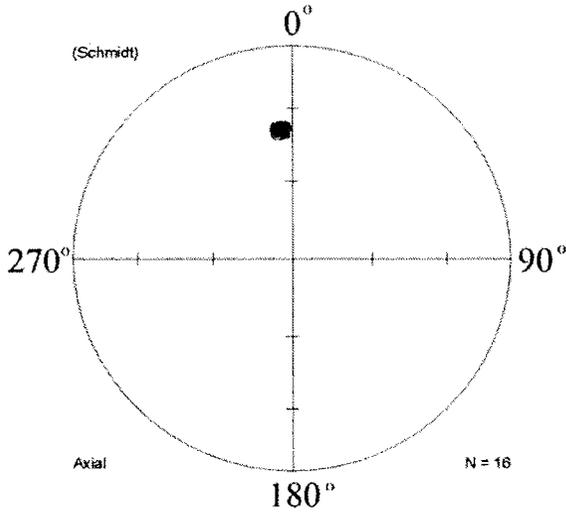
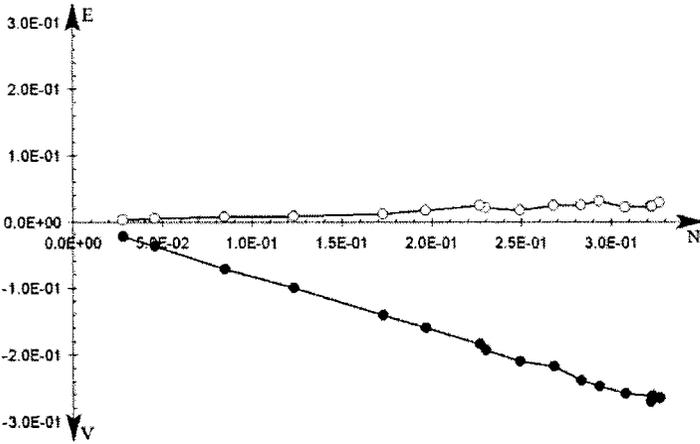
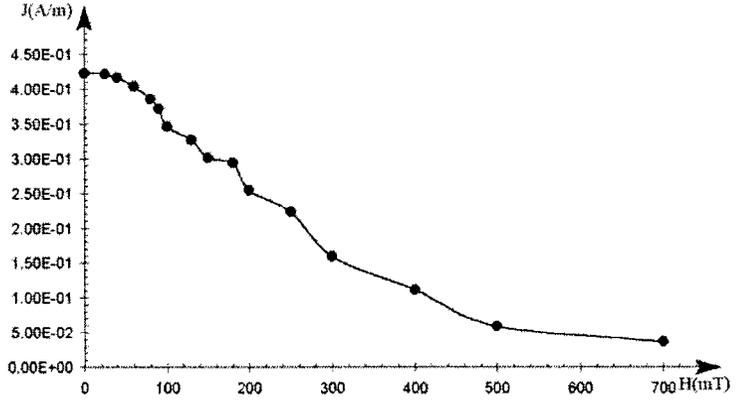


X2-A

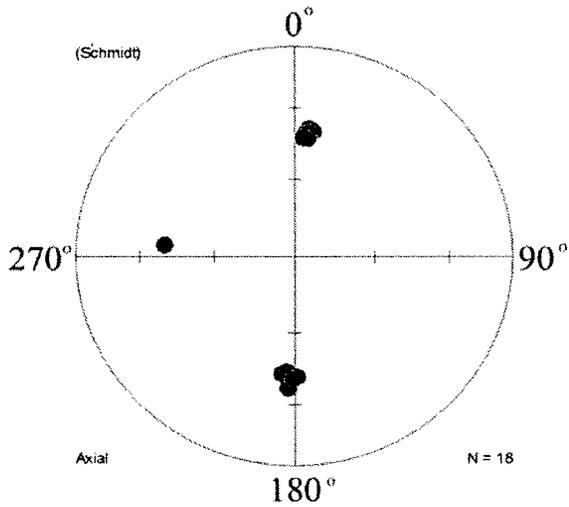
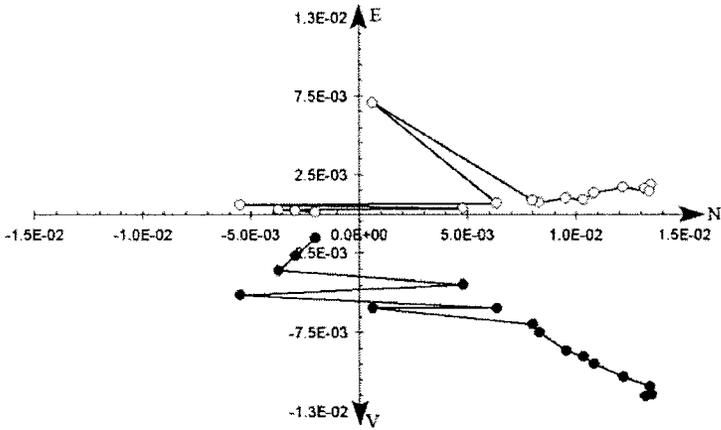
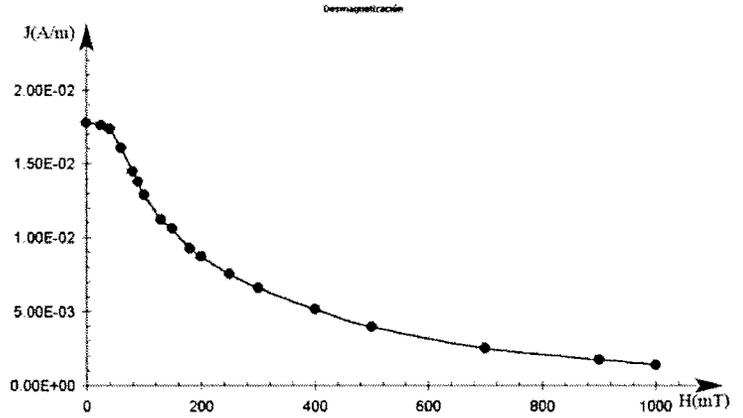


X2-B

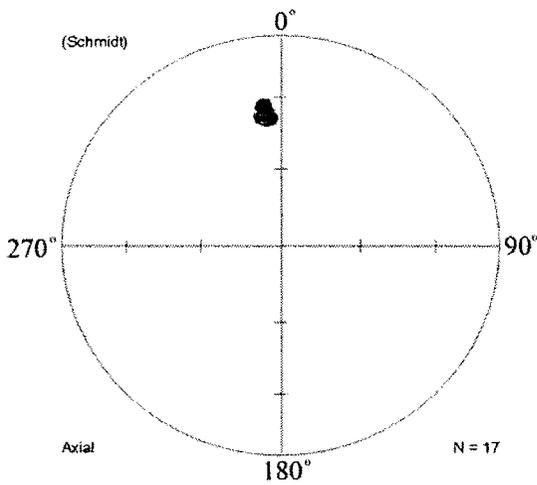
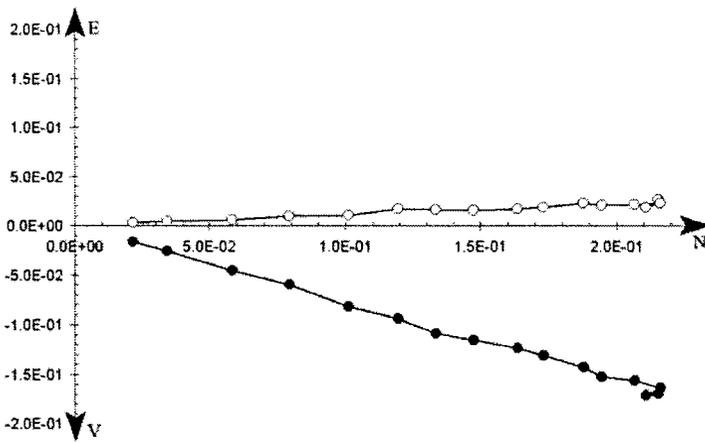
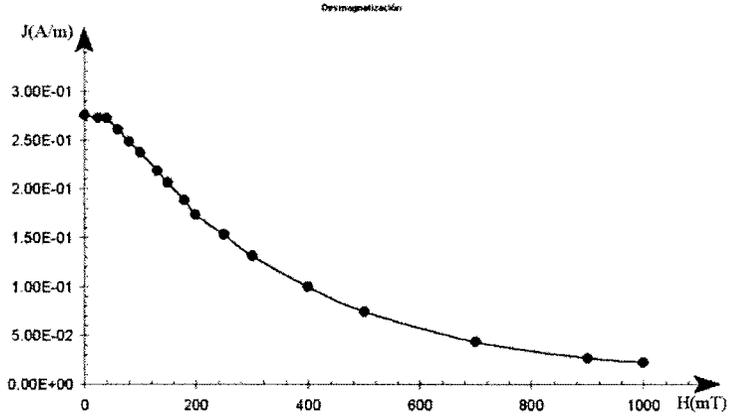
Desmagnetización



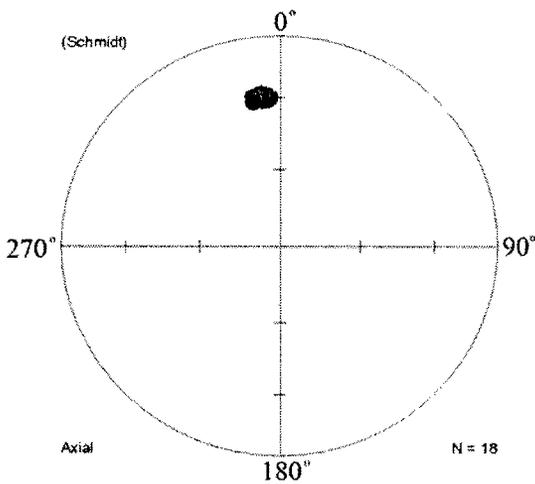
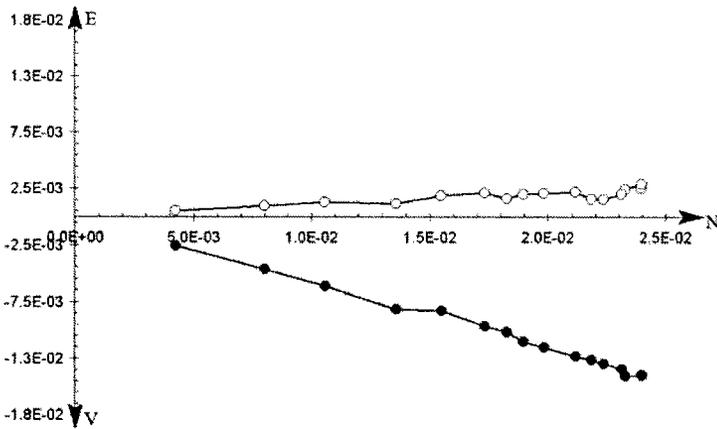
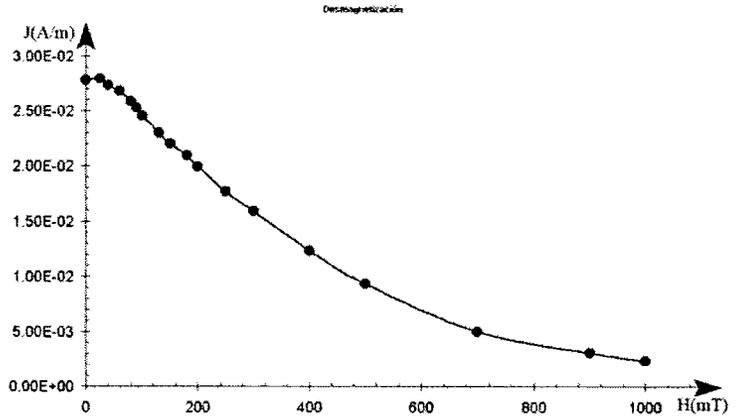
X2-C



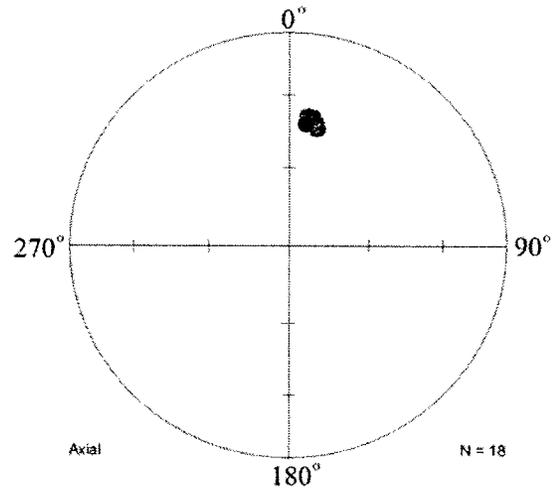
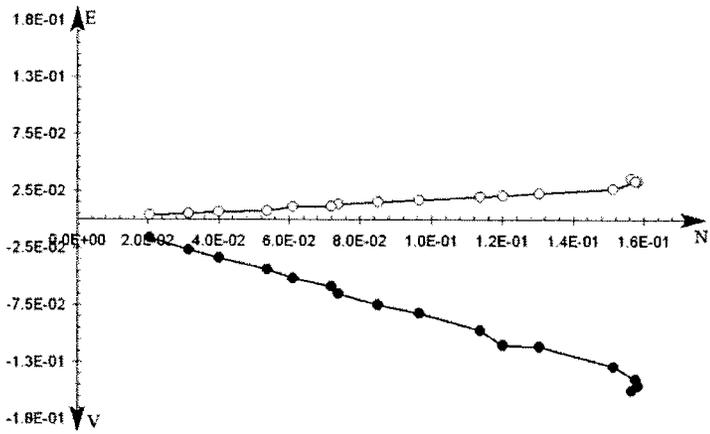
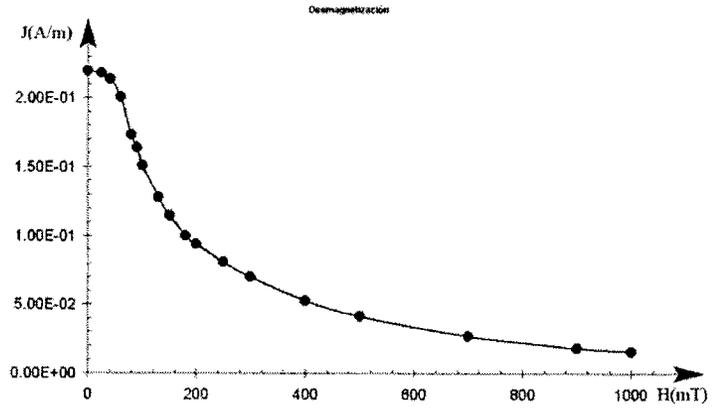
# X2-D



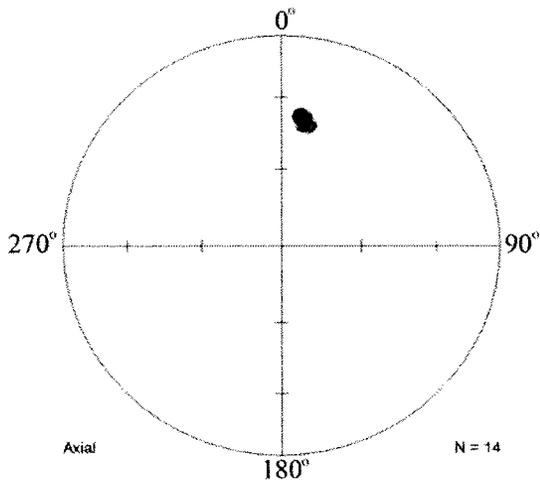
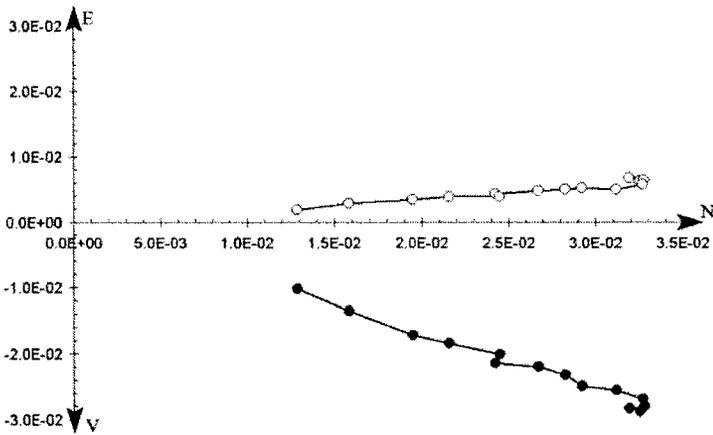
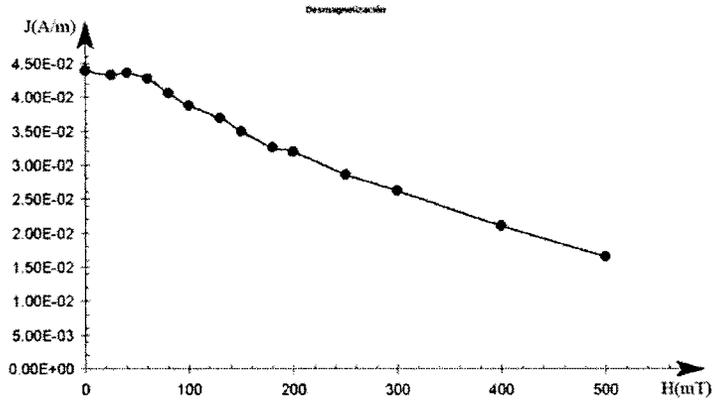
# X2-E



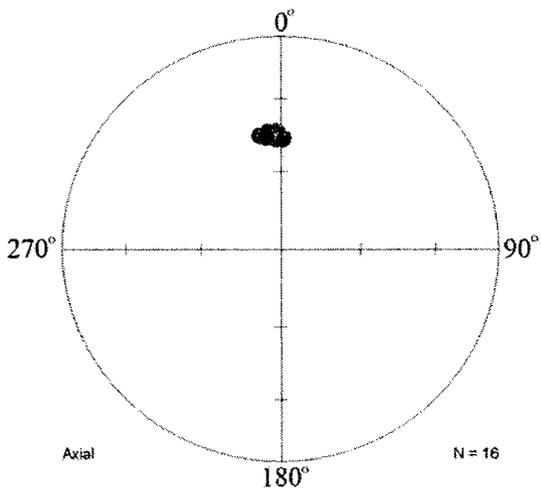
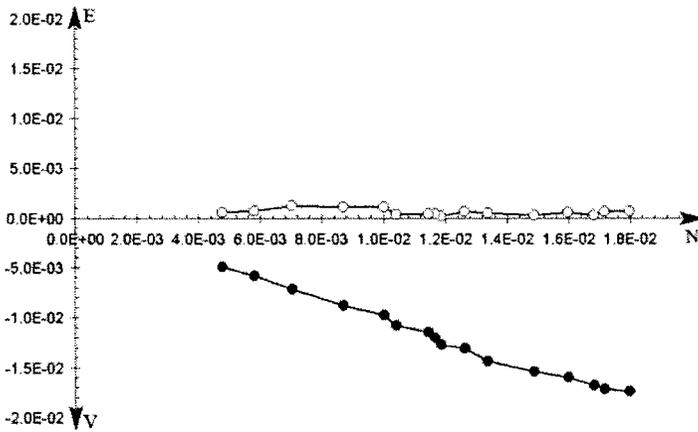
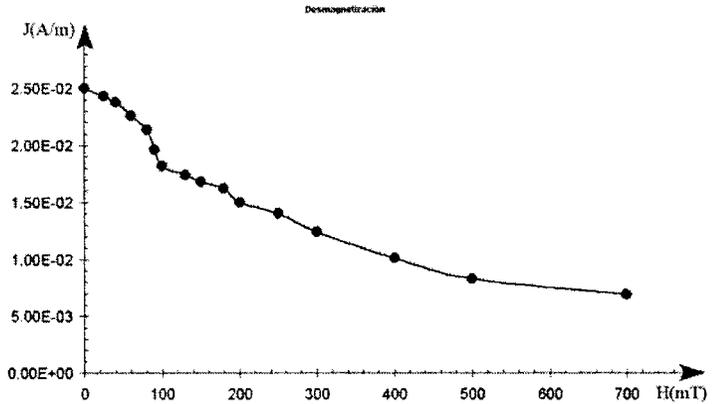
X3-A



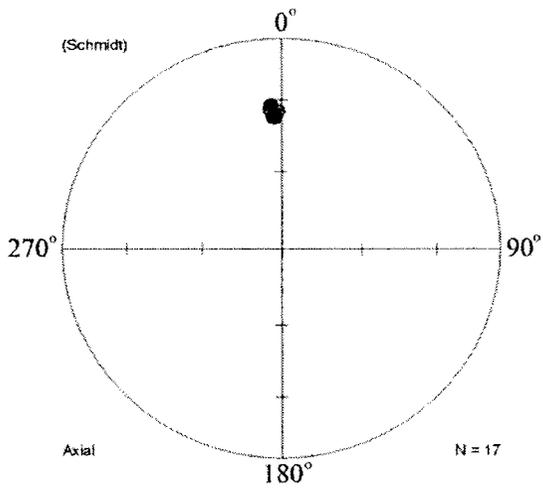
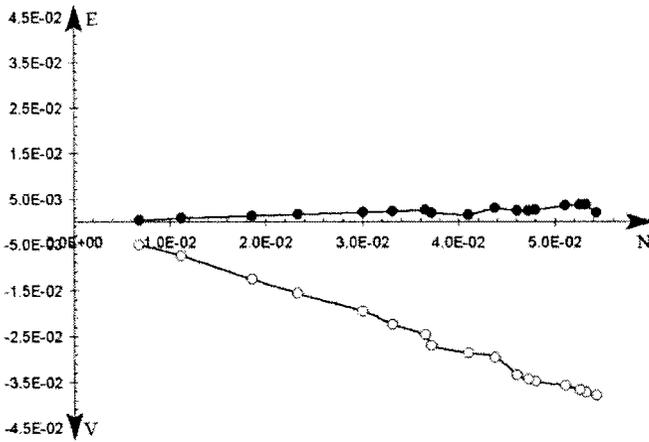
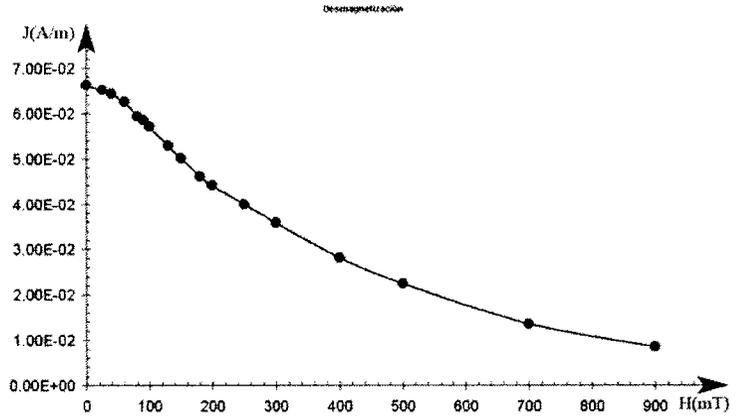
X3-B



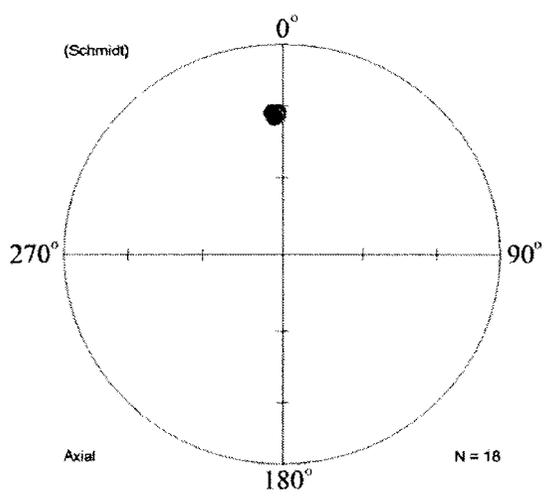
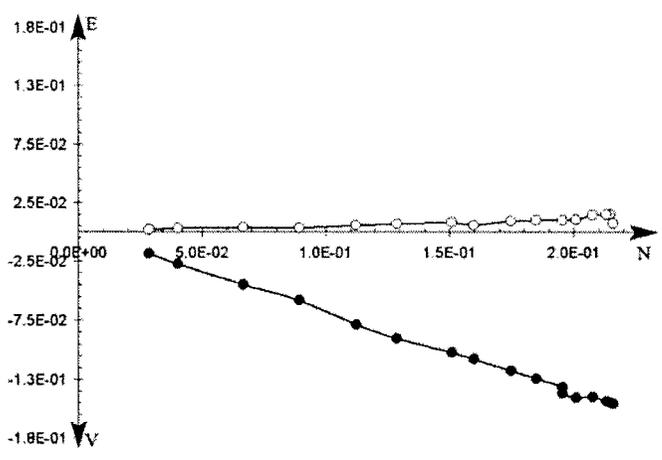
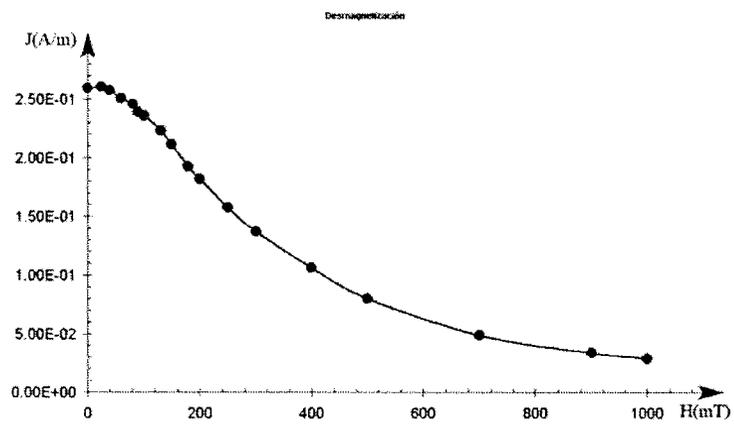
X3-C



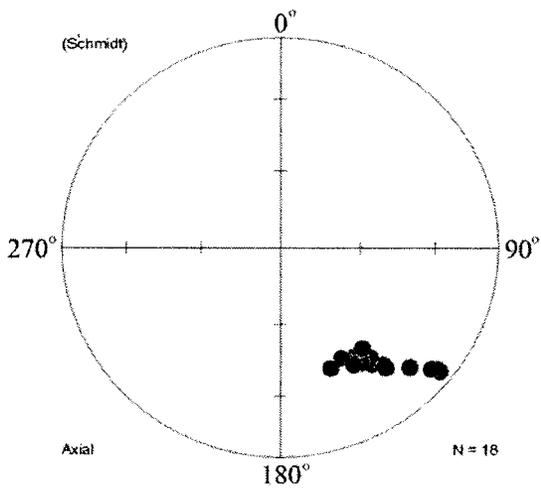
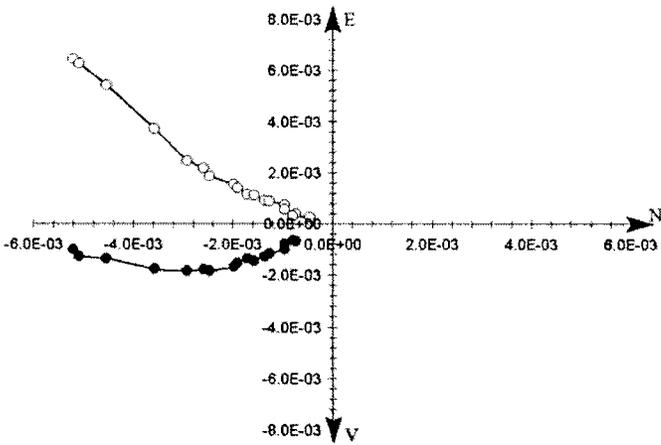
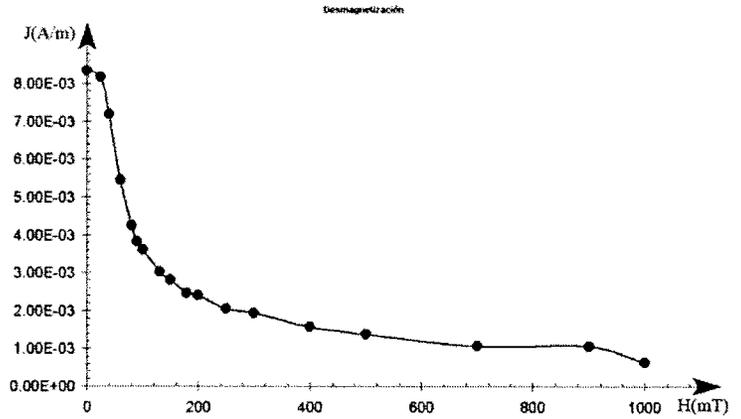
X5-A



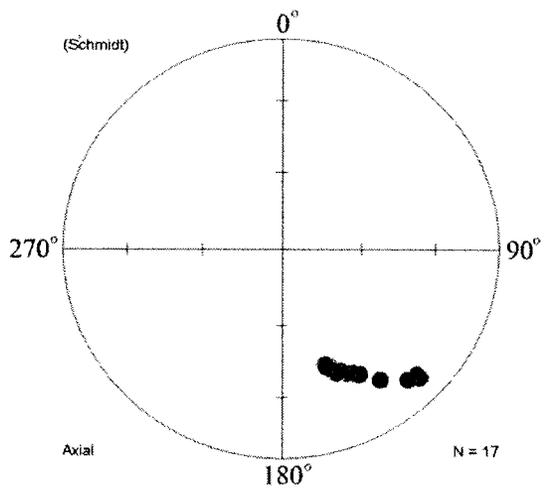
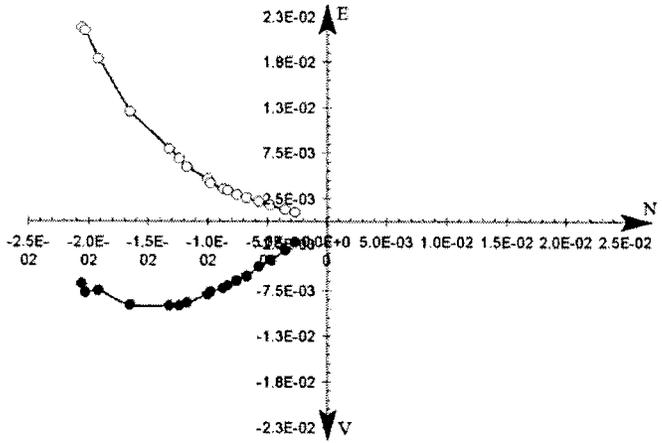
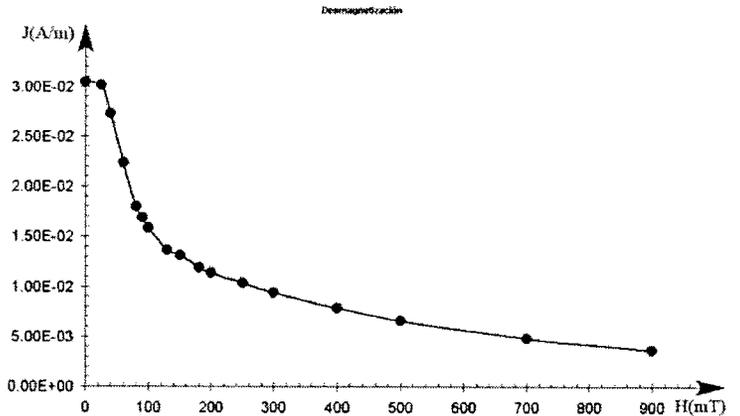
X5-B



X6-A

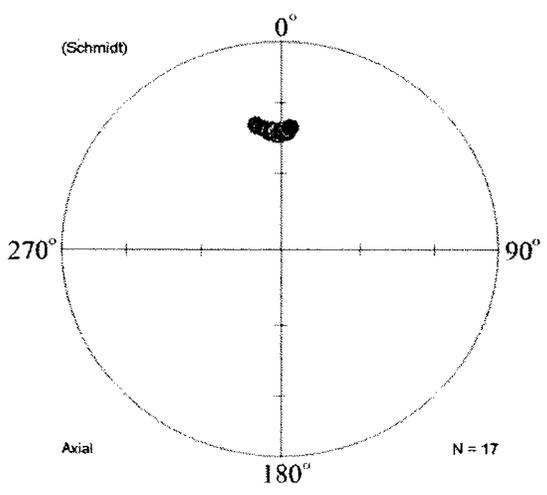
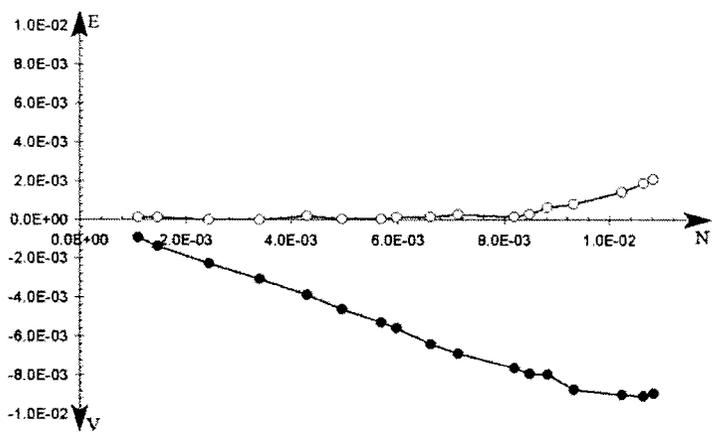
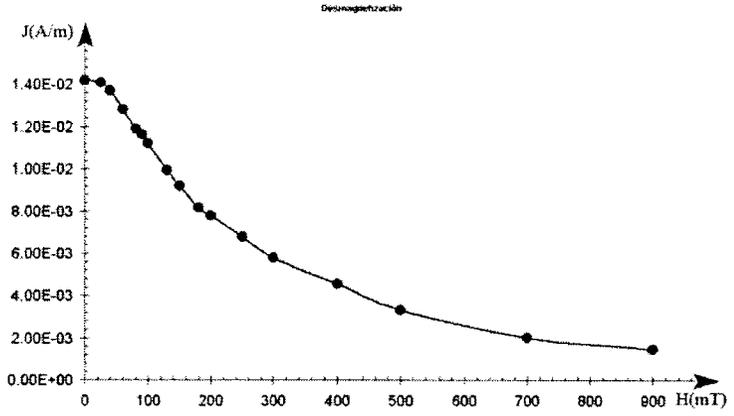


X6-B

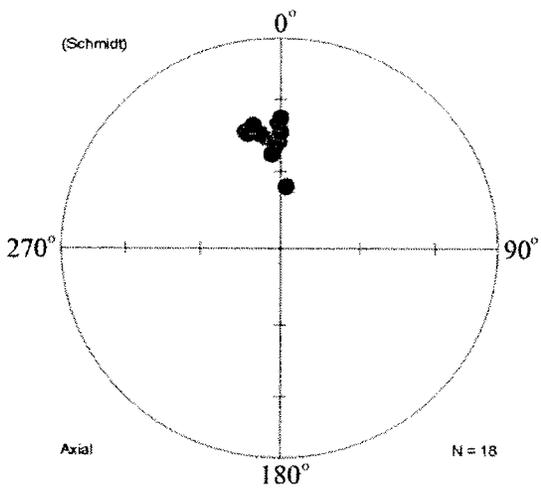
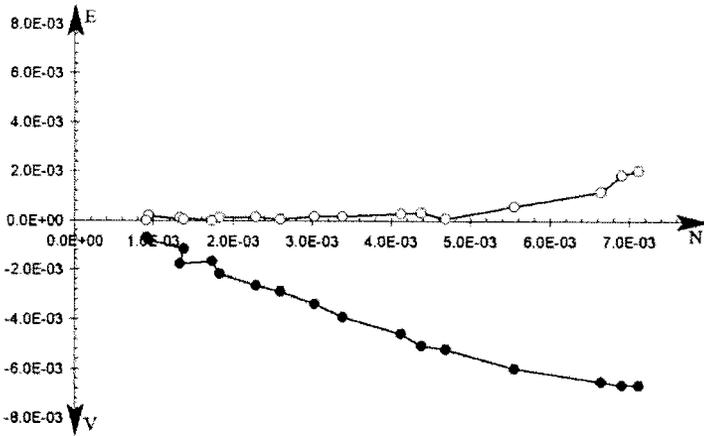
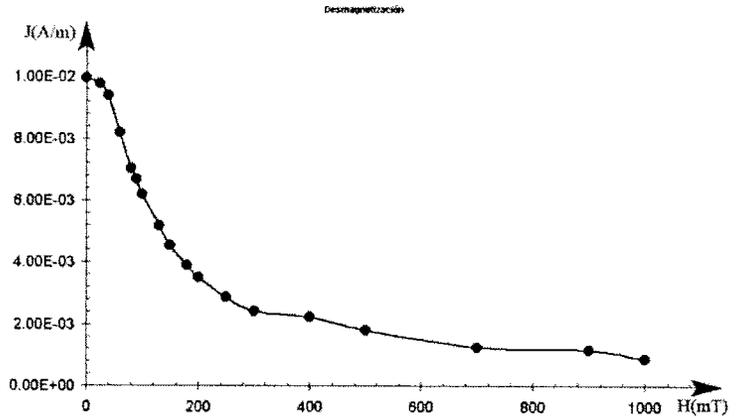




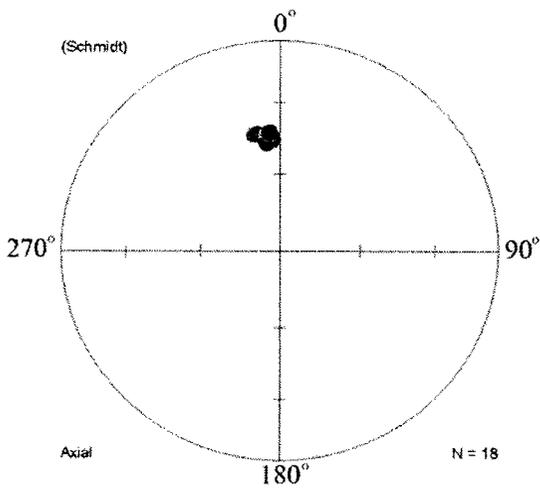
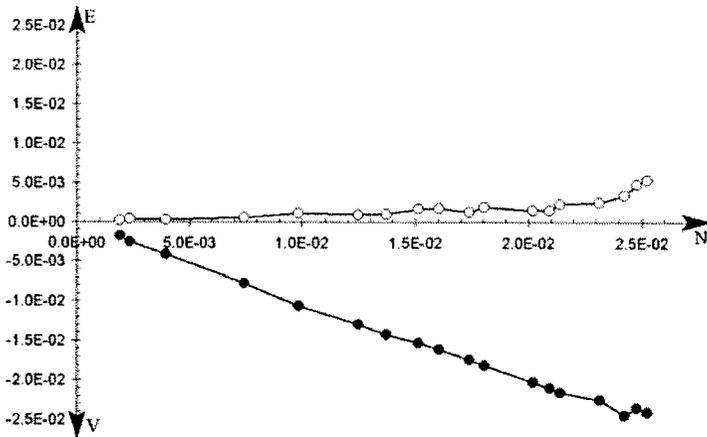
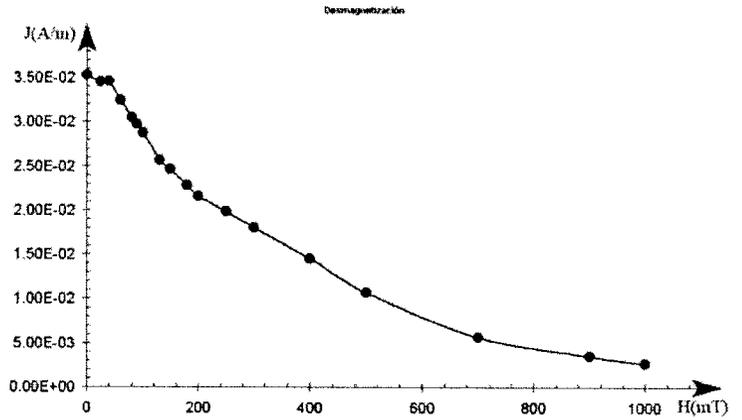
X8-A



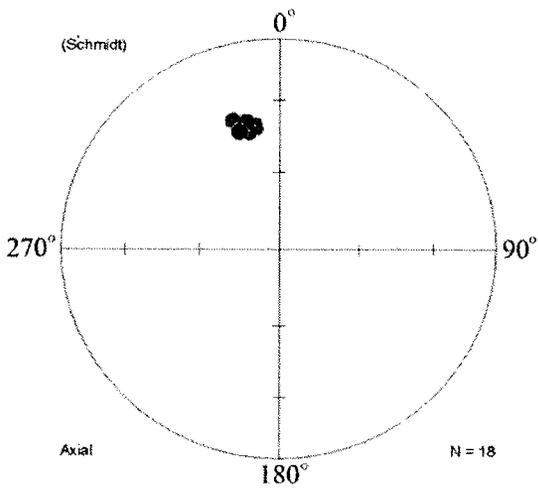
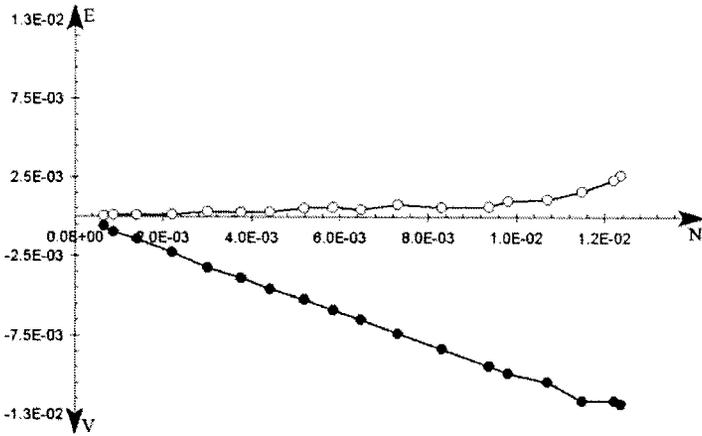
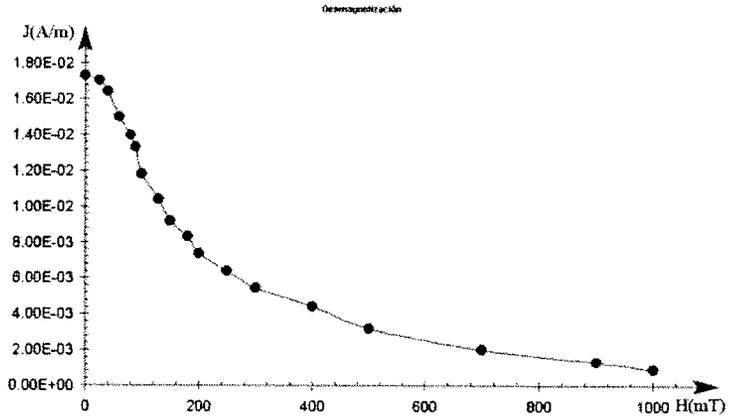
X8-B



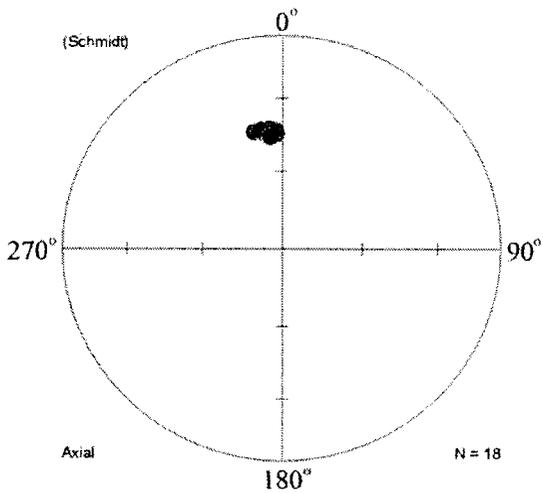
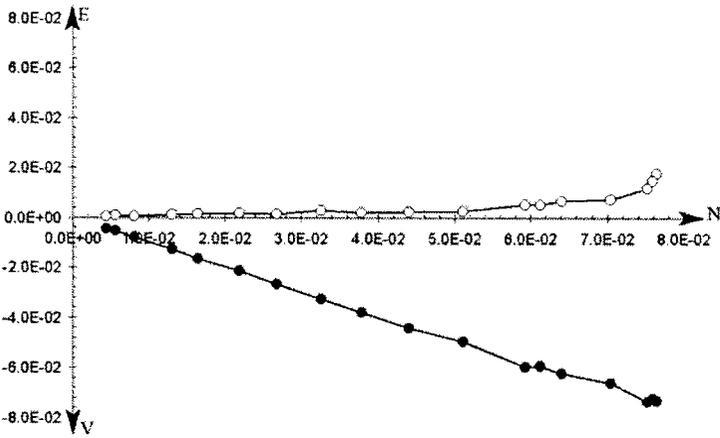
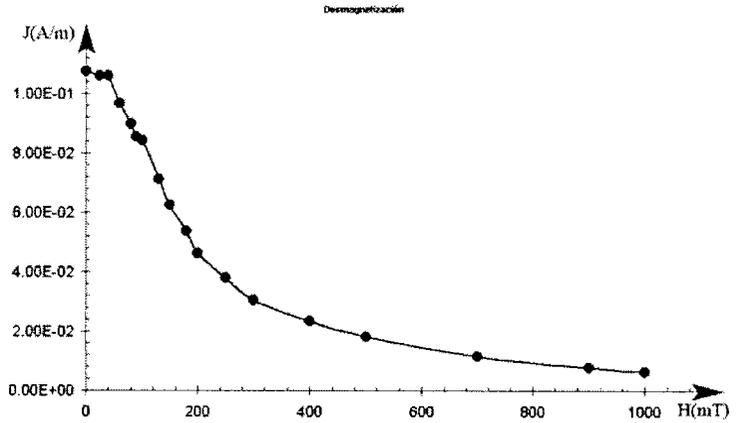
X8-C



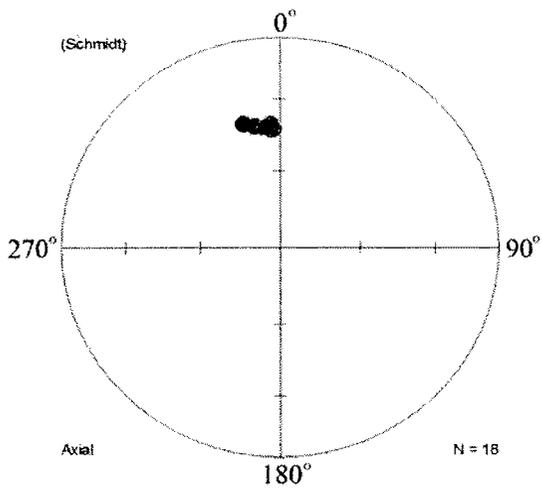
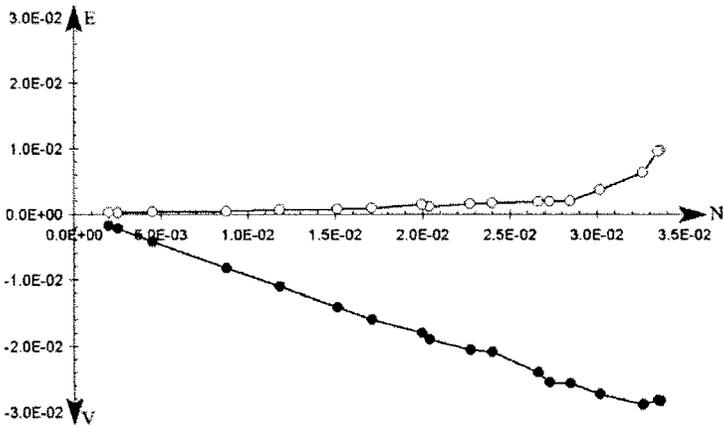
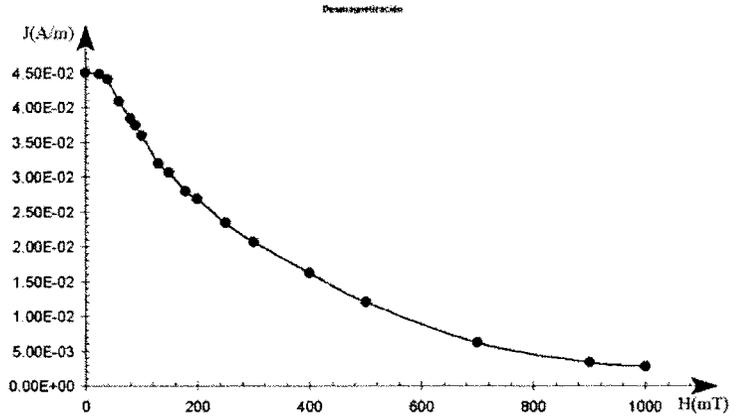
X9-A



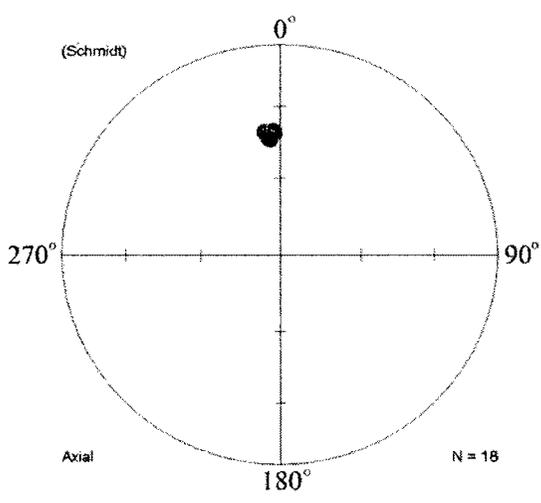
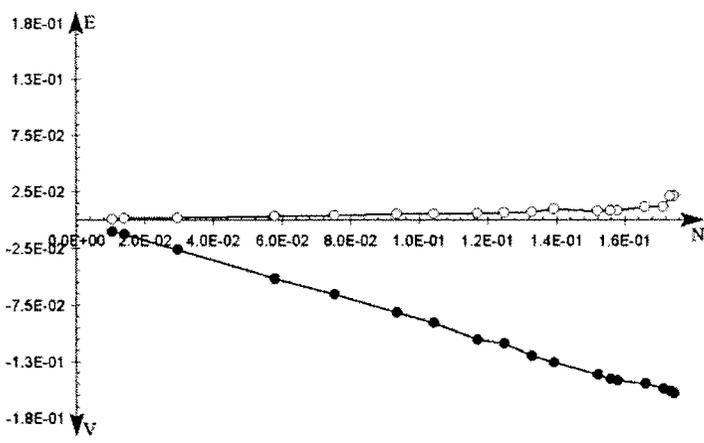
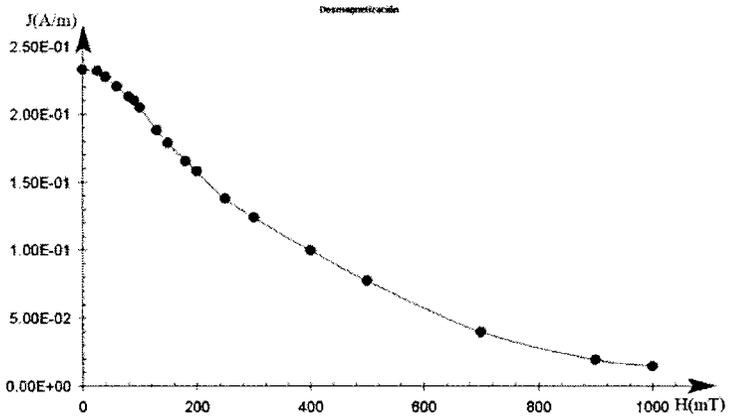
X9-B



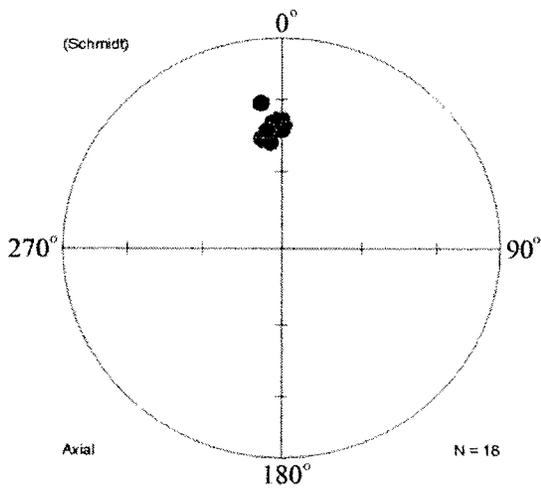
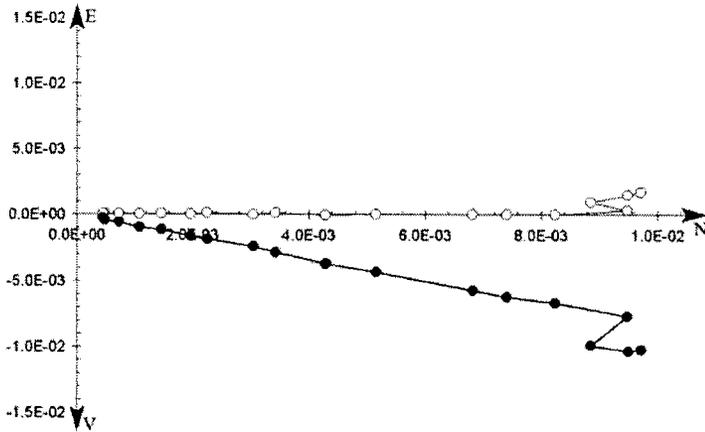
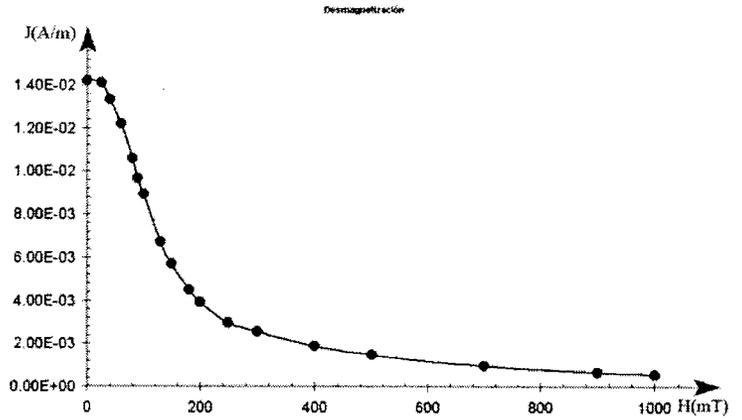
X9-C



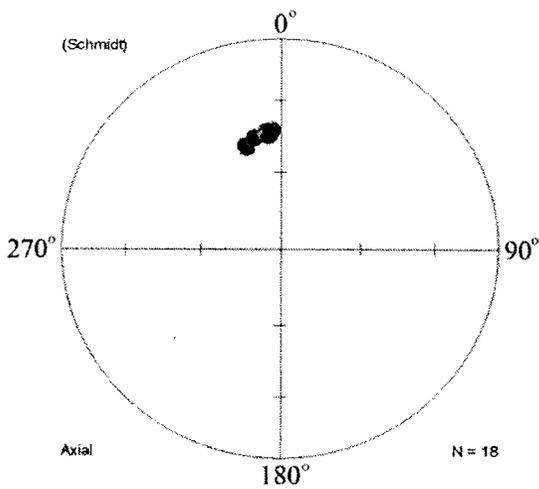
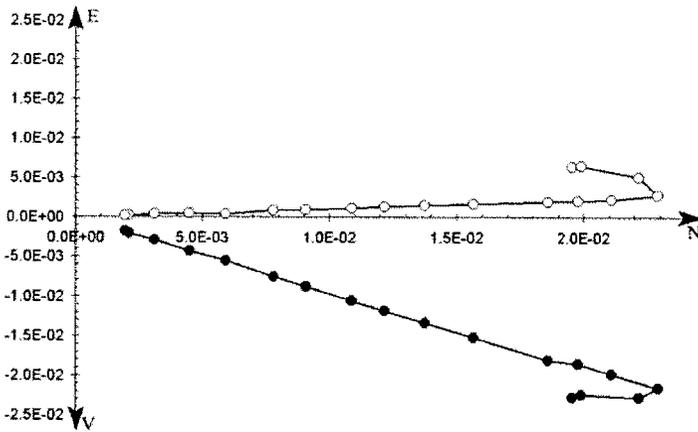
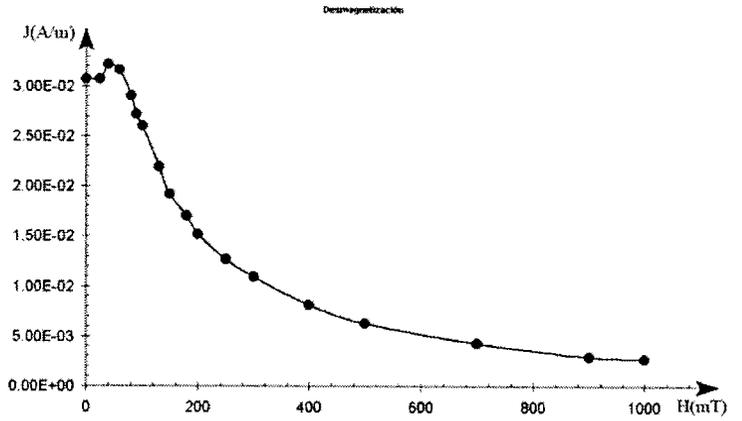
# X9-D



X9-E

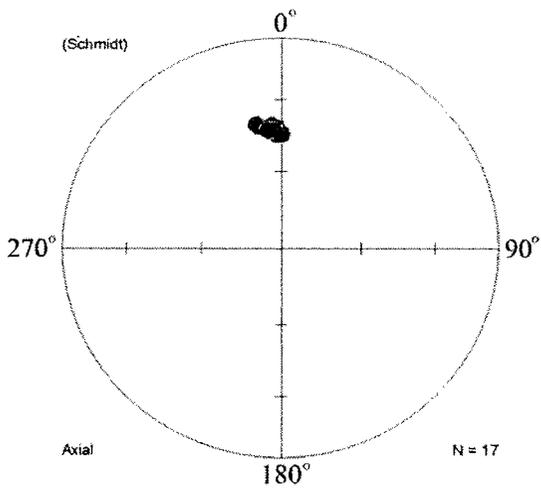
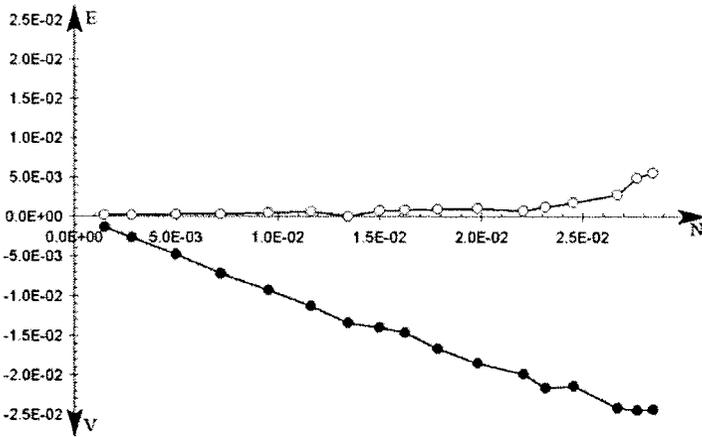
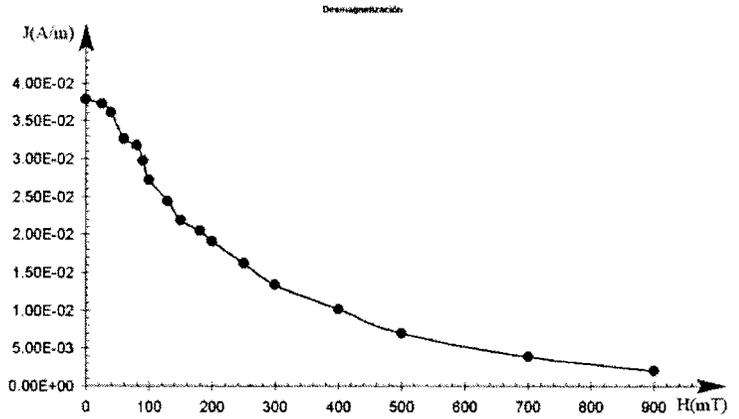


X9-F

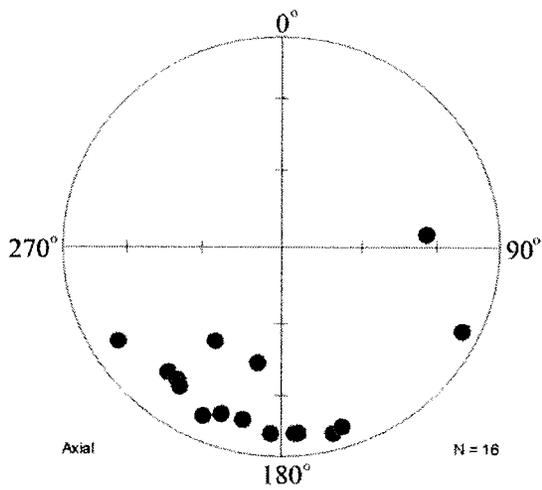
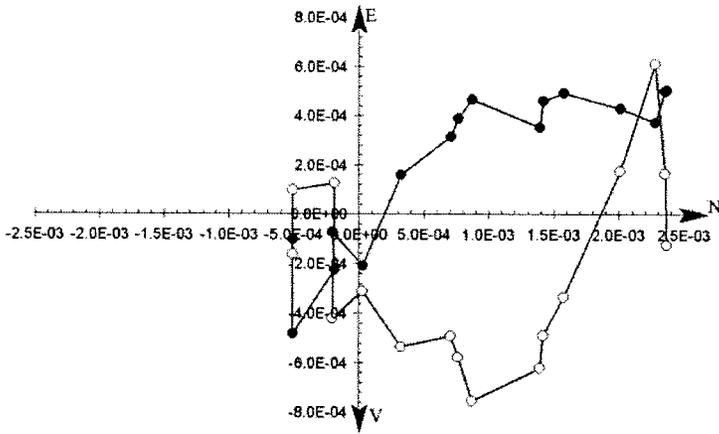
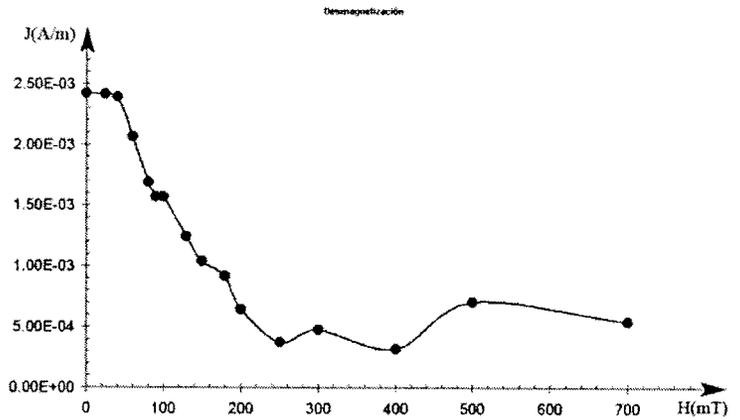




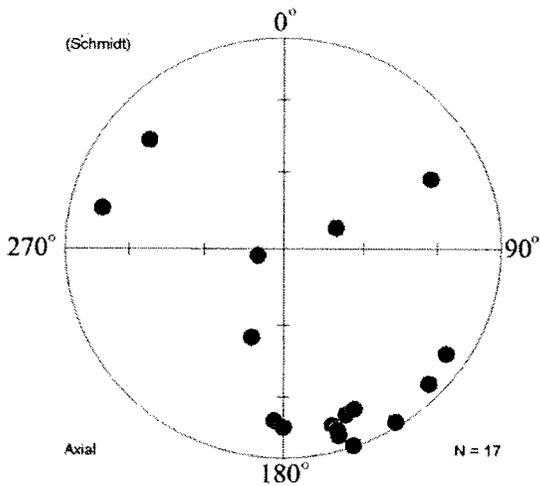
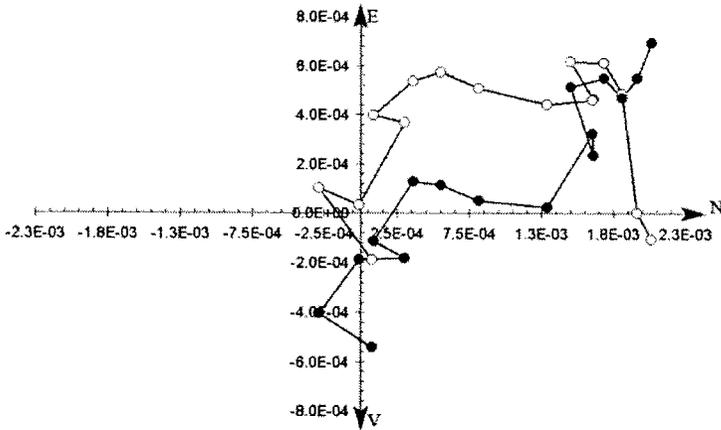
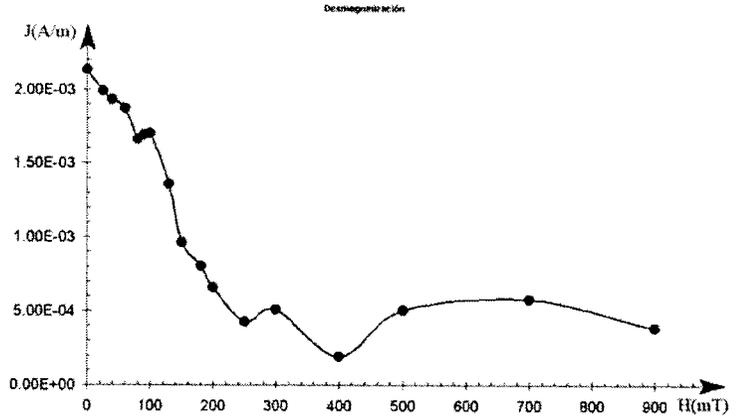
X9-H



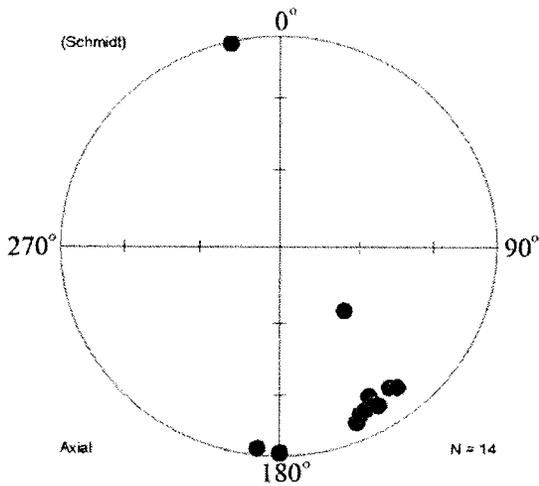
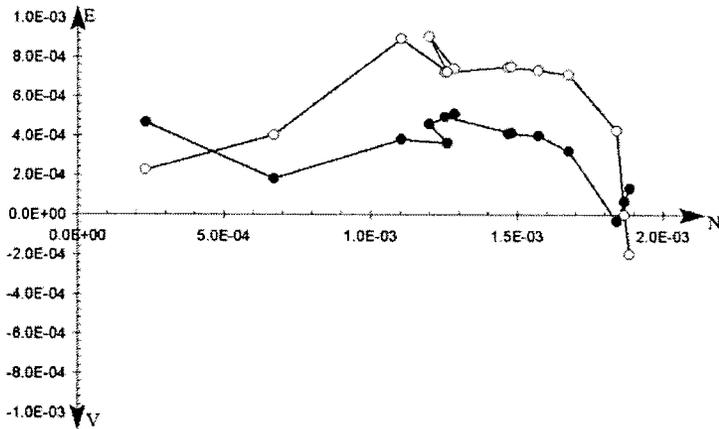
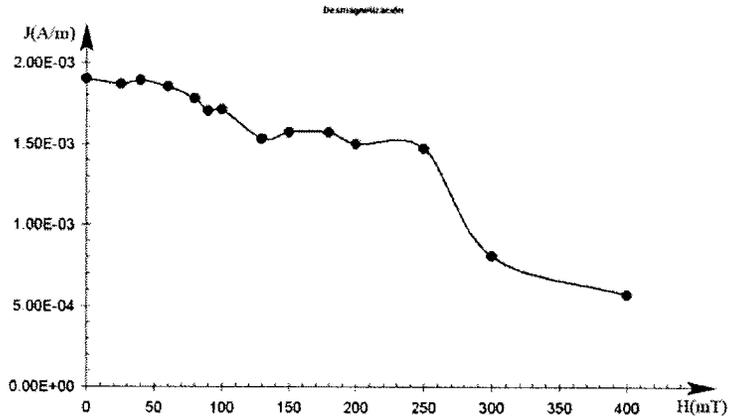
X10-A



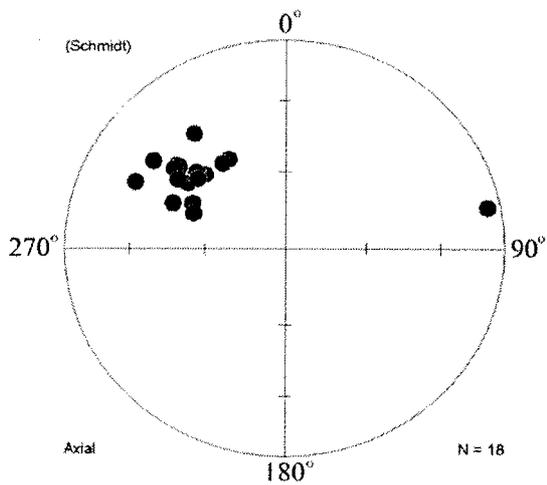
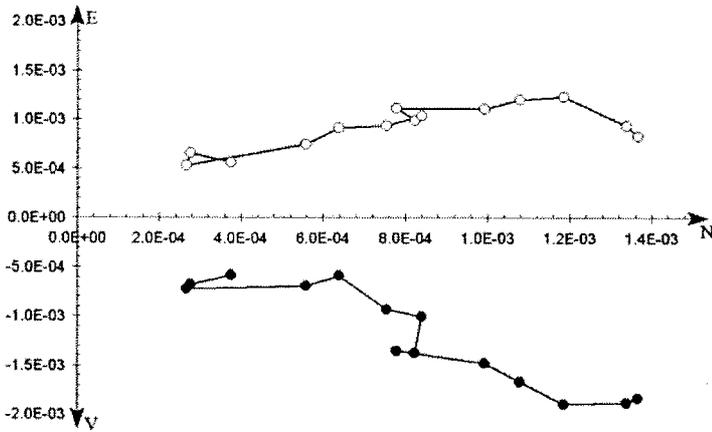
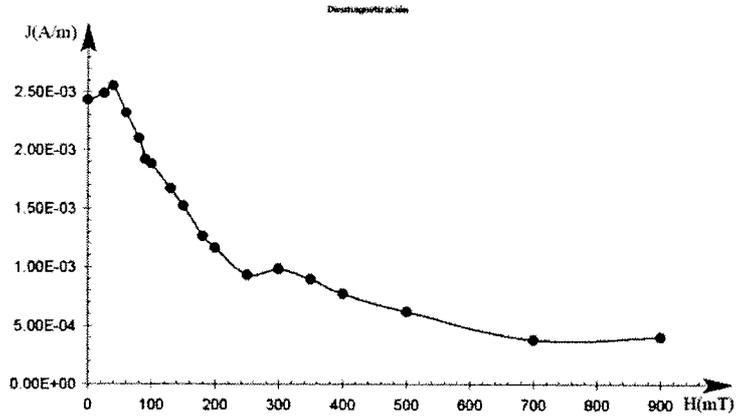
X10-B



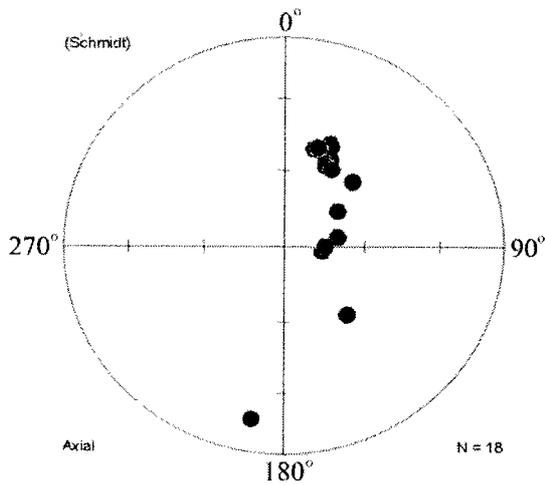
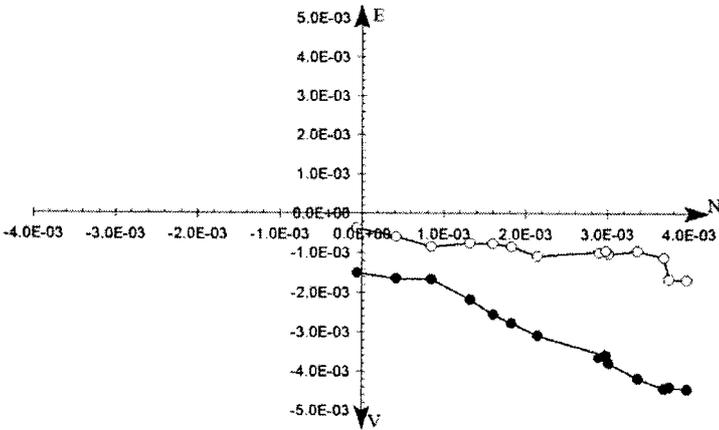
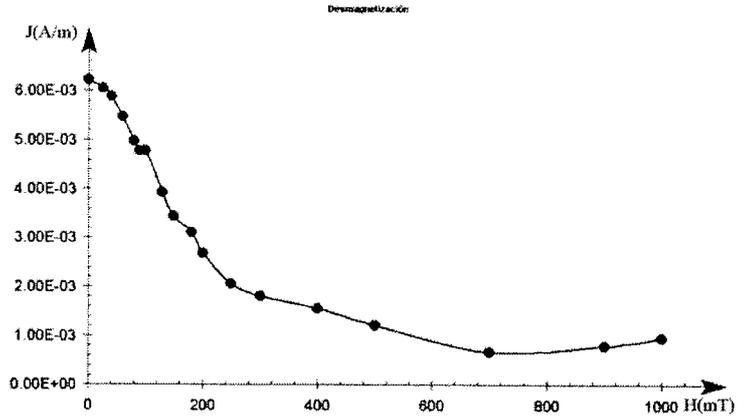
X10-C



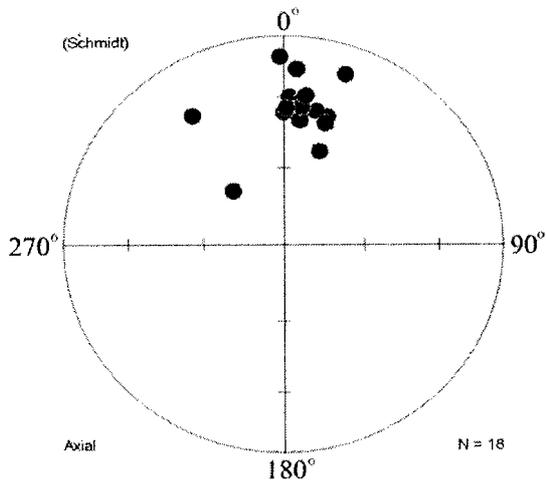
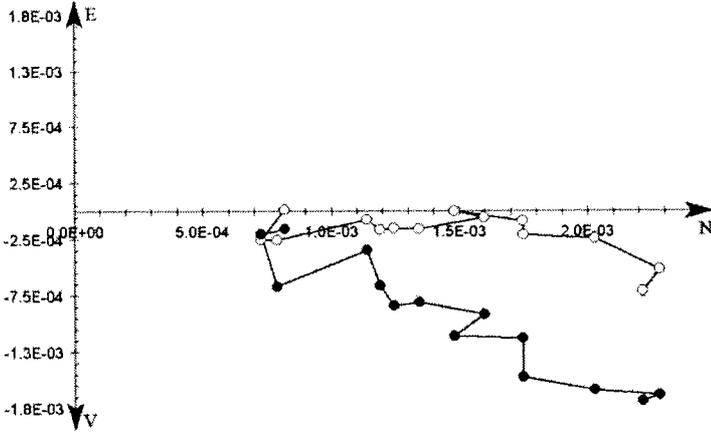
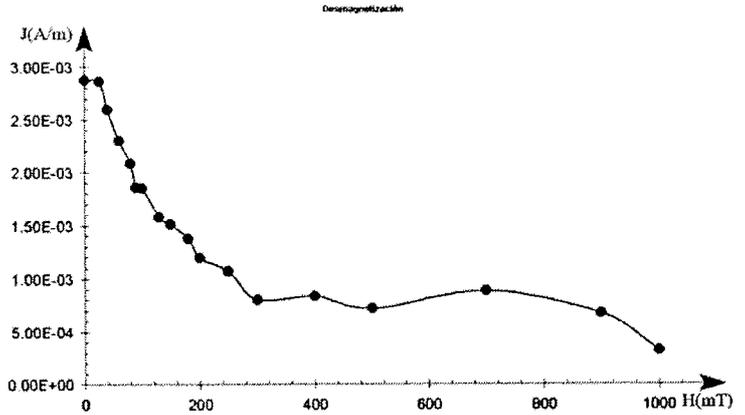
X11-A



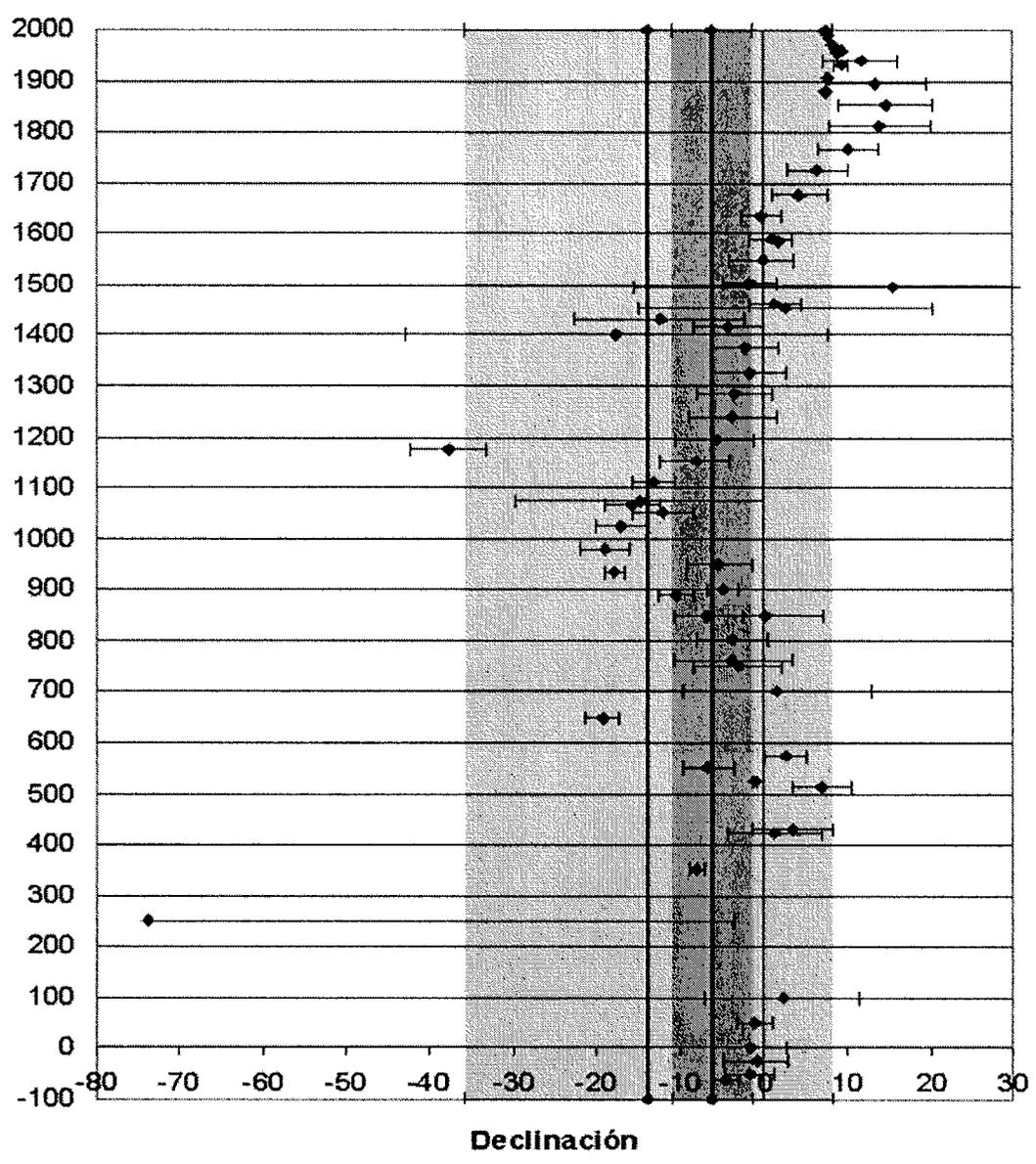
X11-B



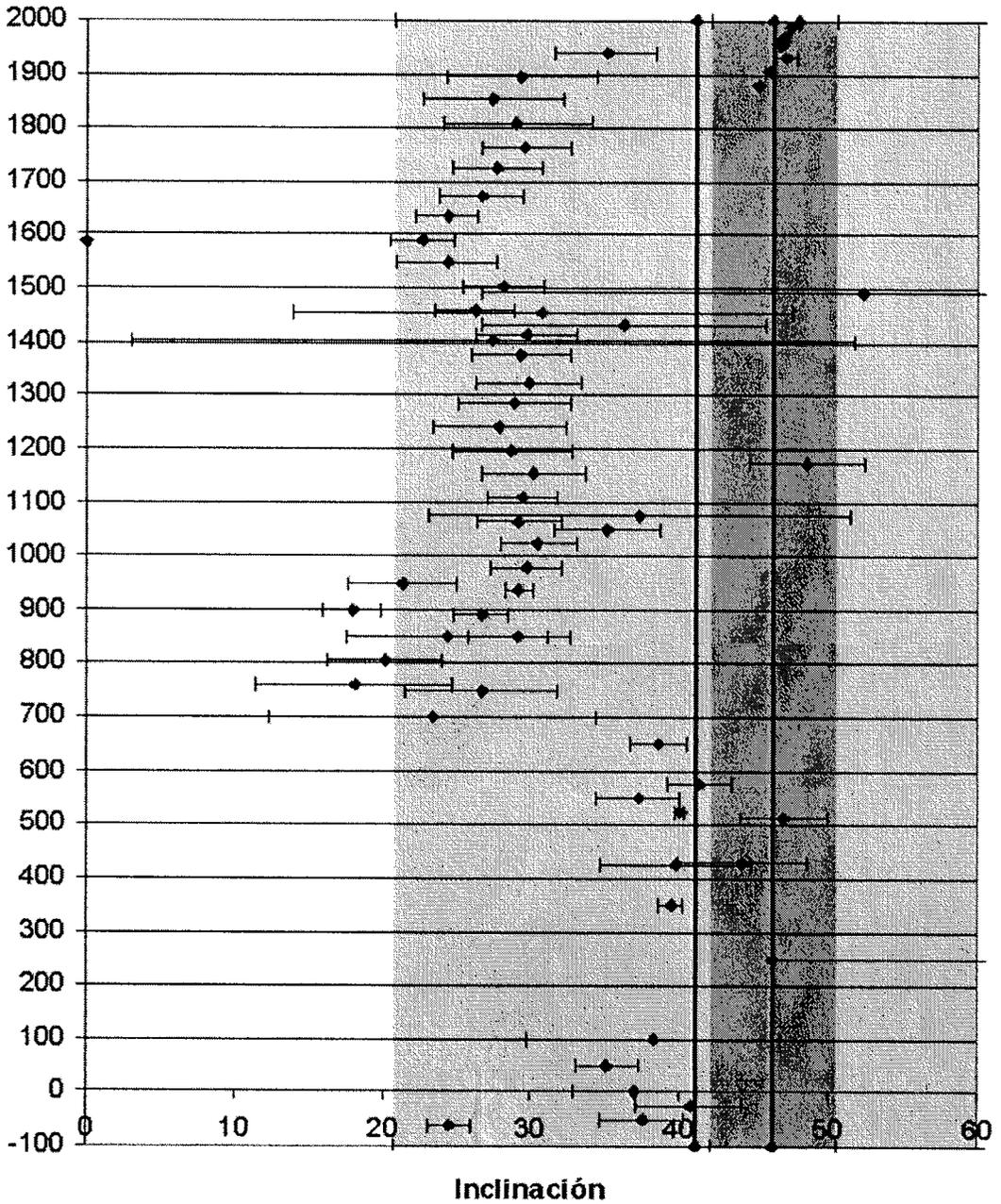
# X11-C



### Teopancazco 1 y 2

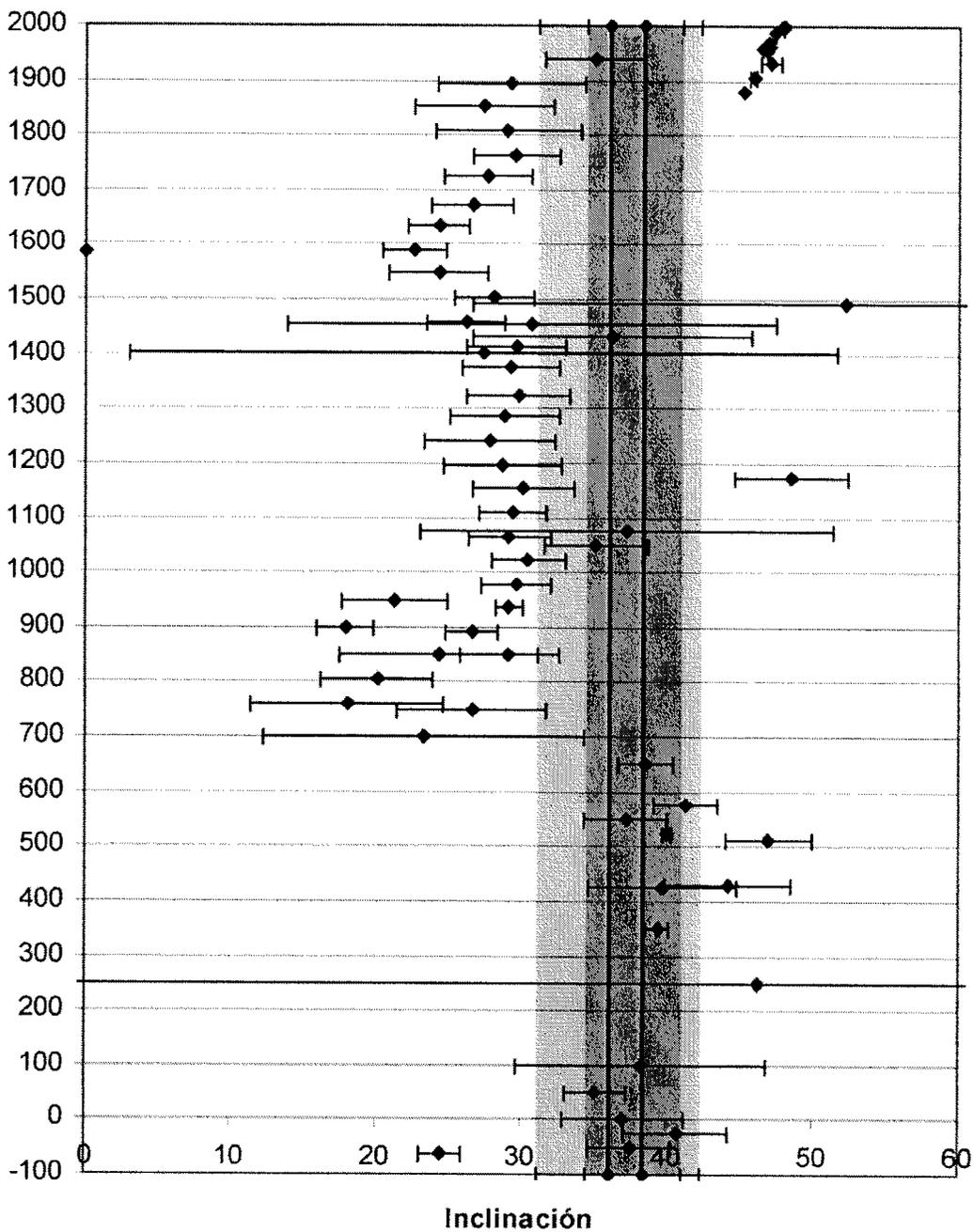


# Teopancazco 1 y 2

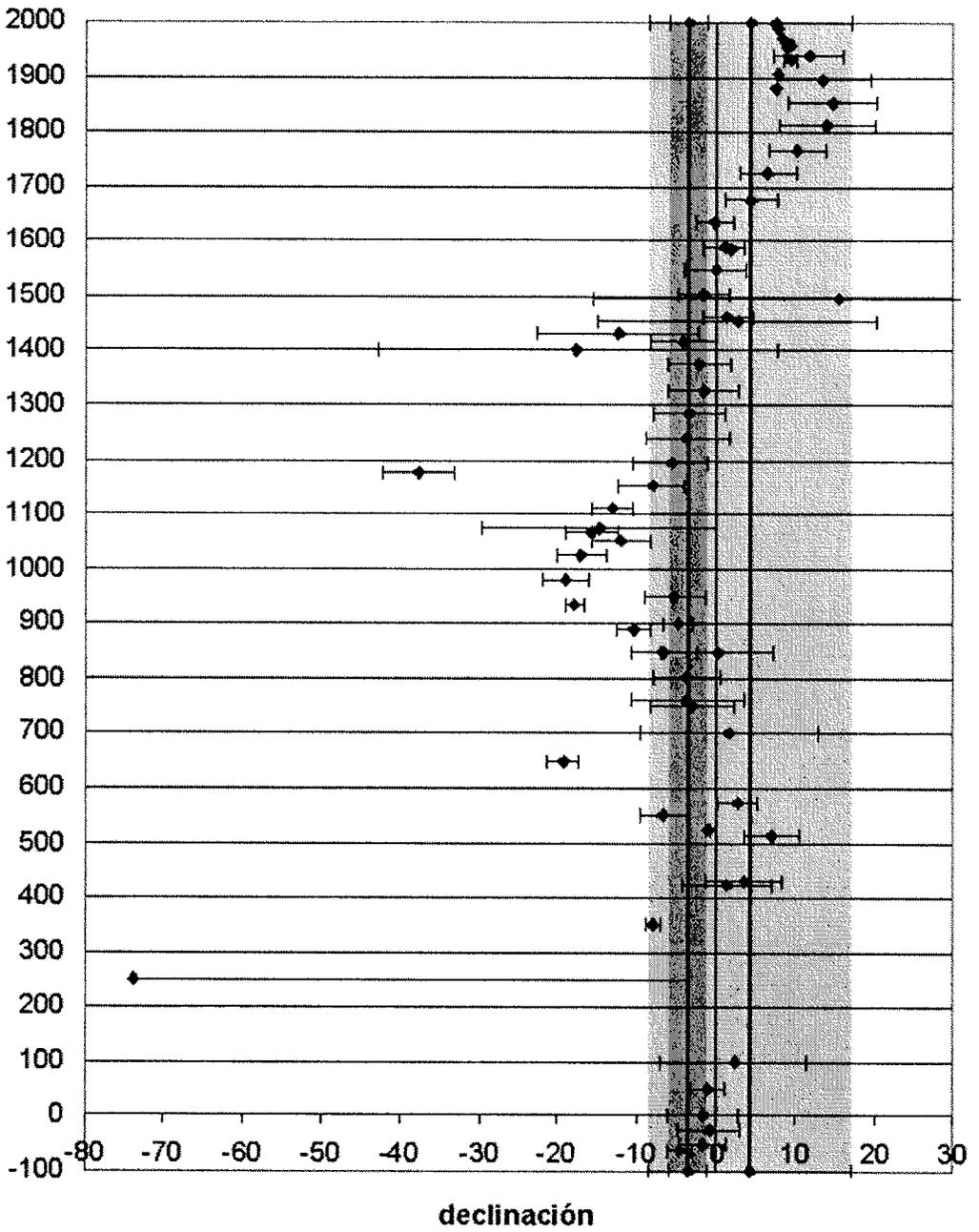




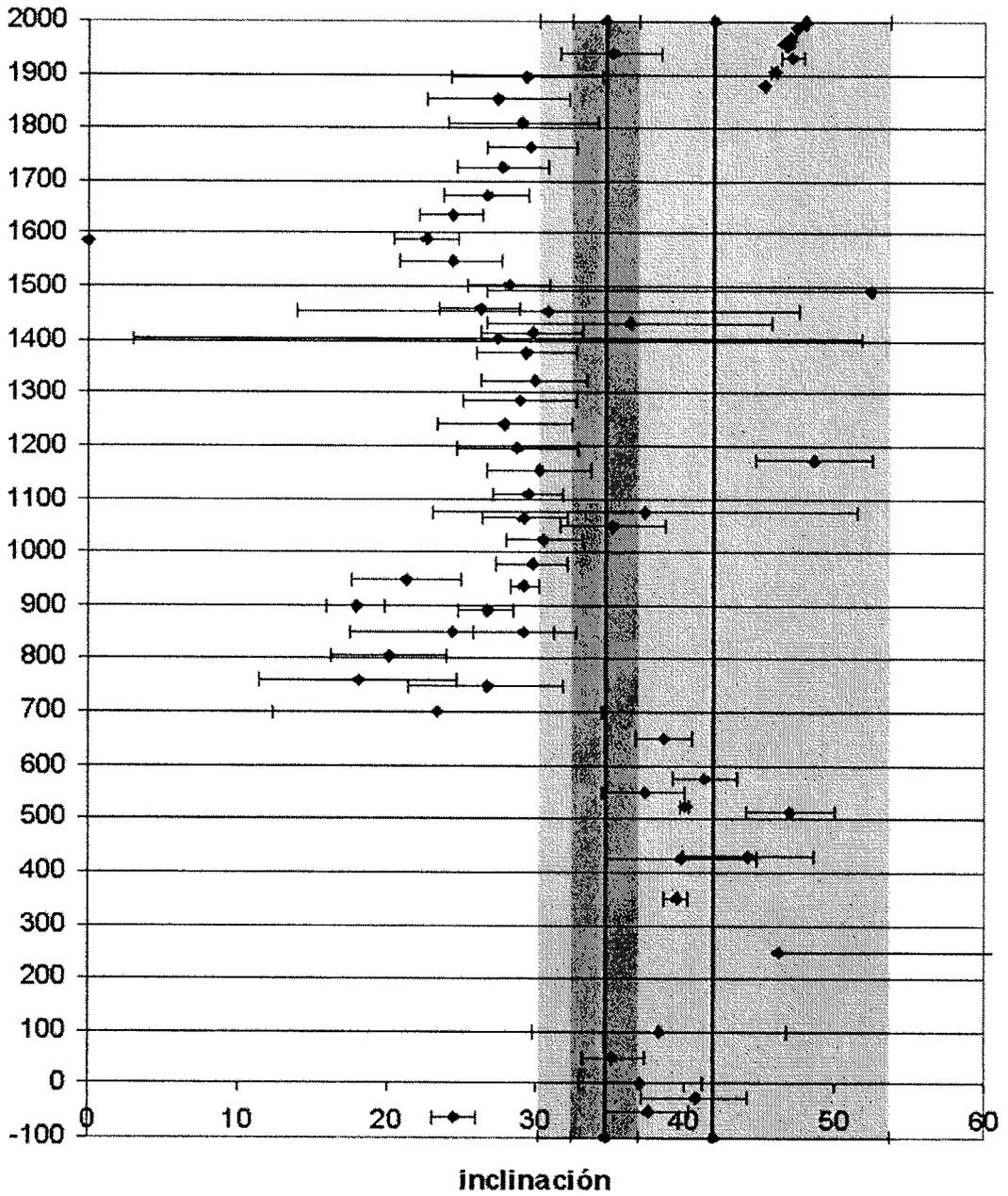
# Xalla 1 y 2



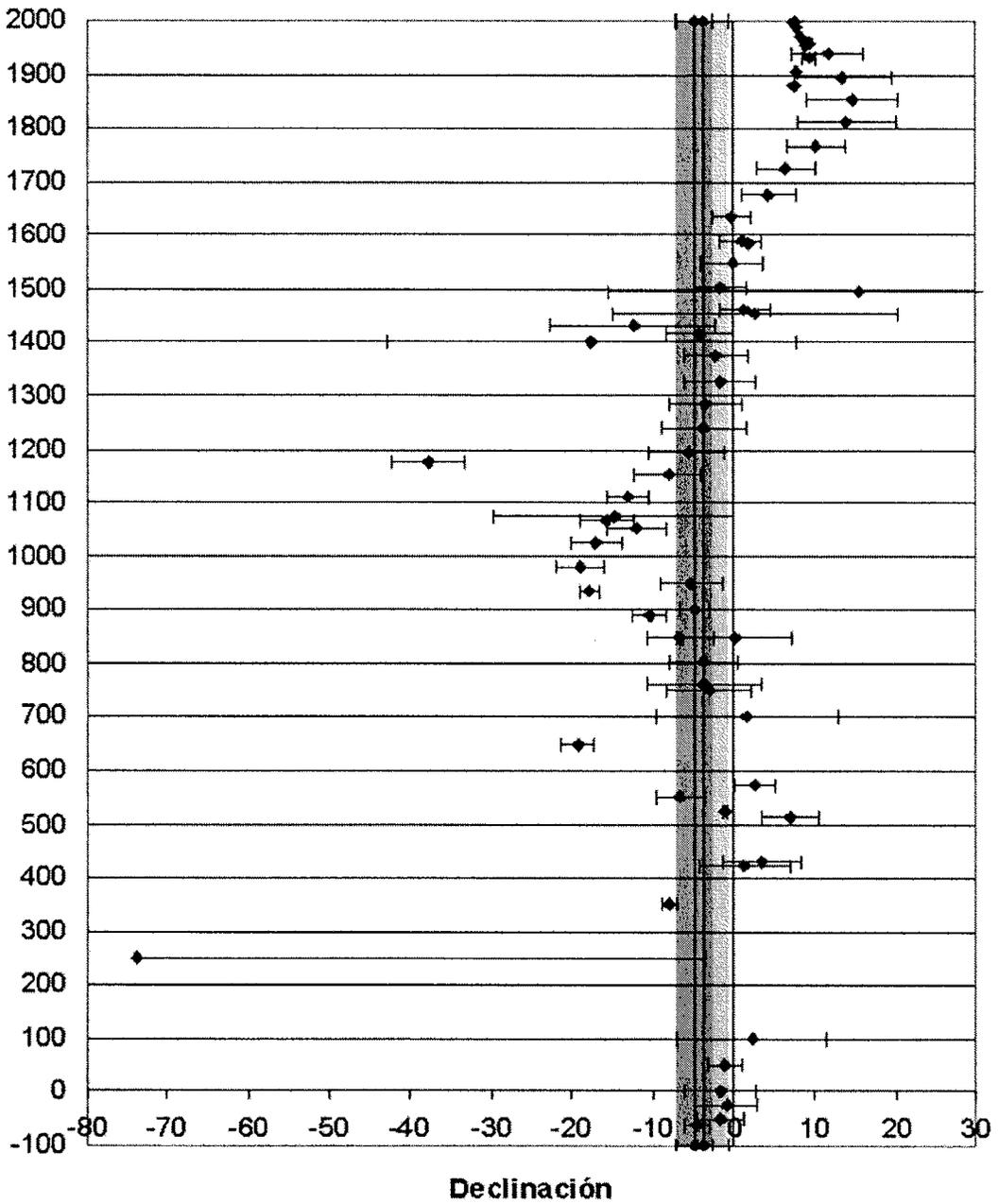
### Xalla 3 y 5



### Xalla 3 y 5



# Xalla 8 y 9



# Xalla 8 y 9

