



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO EN EL ÁREA DE
TECÁMAC, ESTADO DE MÉXICO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F Í S I C A

P R E S E N T A:

SAMANTA PATRICIA SAAVEDRA CORTÉS



**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ANA MARÍA SOLER ARECHALDE
2010**



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.

1. Datos del alumno
Saavedra
Cortés
Samanta Patricia
56 73 60 64
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
302135611
2. Datos del tutor
Dra.
Ana María
Soler
Arechalde
3. Datos del sinodal 1
Dr.
Luis
Quintanar
Robles
4. Datos del sinodal 2
M. en Arqueología
Nadia Verónica
Vélez
Saldaña
5. Datos del sinodal 3
Dr.
José Luis
Ruvalcaba
Sil
6. Datos del sinodal 4
Fís.
René
Ortega
Alvarado
7. Datos del trabajo escrito
Estudio arqueomagnético en el área de Tecámac, Estado de México
84 p
2010

Agradecimientos:

Agradezco las facilidades prestadas por los Laboratorios de Paleomagnetismo y Geofísica Nuclear y al Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural de la UNAM, donde se realizaron los experimentos.

A los arqueólogos Nadia V. Vélez Saldaña y Manuel Gamboa quienes hicieron posible el proyecto de salvamento arqueológico en el sitio Héroe de Tecámac, Tecámac, Estado de México y a los arqueólogos Vicente Martínez Miranda, Juan Manuel Martínez y Antonio Balcorta Yepez por estar presentes en las excavaciones de dicho sitio.

A los Dres. Ana María Soler Arechalde y Avto Goguichaichvili por su paciencia y atención en la realización de este trabajo.

A Dani, Vero y Rodrigo por su compañerismo y ayuda en el laboratorio para la realización de los experimentos.

A mis padres por su gran sabiduría, por nunca dejarme sola, por su comprensión, por darme una excelente educación y por su apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de toda mi vida, los amo con todo el corazón.

A mi hermana y mejor amiga Melissa, por darme siempre su amistad y apoyo, por compartir conmigo sus alegrías y por hacerme la tía de un niño maravilloso, Francisco: gracias por enseñarme las cosas sencillas de la vida, las cuales vamos olvidando con el paso de los años, ¡los adoro a los dos!

A Iván, Zaira, Reno y Angelly por su amistad y por compartir conmigo momentos muy divertidos a lo largo de toda la carrera.

Índice:

Introducción	iii
Capítulo 1: La física del magnetismo	1
• Campo Magnético	1
• Momento Magnético	1
• Flujo Magnético	2
• Energía Magnética	3
• Relación entre \vec{B} y \vec{H}	4
• Potencial Magnético	4
• El Geodynamo	5
• Campo magnético terrestre	6
• Componentes del vector magnético	7
• Propiedades del campo magnético	9
• Polos geomagnéticos virtuales (VGP)	10
Capítulo 2: Arqueomagnetismo	12
• Geomagnetismo	12
• Magnetismo en rocas	16
• Paleomagnetismo	18
• Metodología paleomagnética	18
Capítulo 3: Contexto Arqueológico	22
• Contextos arqueológicos muestreados	24
• Frente de excavación 1A (Muestras HT1 y HT2)	25

• Frente de excavación 2 (Muestras HT5, HT6 y HT7)	30
• Frente de excavación 5 (Muestras HT3 y HT4)	36
Capítulo 4: Toma y procesamiento de muestras arqueomagnéticas	39
Capítulo 5: Resultados y análisis de datos	42
• Muestra HT1	42
• Muestra HT2	47
• Muestra HT3	54
• Muestra HT4	57
• Muestra HT5	62
• Muestra HT6	65
• Muestra HT7	70
Capítulo 6: Conclusiones	75
Bibliografía	77

Estudio Arqueomagnético en el área de Tecámac, Estado de México.

Introducción:

En el año 2000 con la presentación de la tesis de Yuki Hueda se reimpulsaron los estudios arqueomagnéticos en México a través del Instituto de Geofísica, dirigidos por la Dra. Ana María Soler; estos han servido para obtener una mejor calibración de la Curva de Variación Secular para el centro de México, la cual registra el cambio del campo magnético terrestre con el paso del tiempo, y nos proporciona las diferentes direcciones que éste ha tenido; por lo que es posible hacer una aproximación de la época en que datan los materiales arqueológicos de acuerdo con la orientación magnética que éstos presenten.

El siguiente trabajo tiene como objetivo determinar la orientación del campo magnético y fecha arqueomagnética de siete muestras de piso tomadas durante los trabajos de excavación del proyecto de salvamento arqueológico "Los Héroes de Tecámac, 2007", en el Estado de México, dirigido por la arqueóloga Nadia Vélez Saldaña; las muestras se procesaron y examinaron para realizar una aproximación de la época de la que éstas datan. Las muestras se tomaron de un sitio salinero del siglo XV, y actualmente se encuentra a 5 km. del centro del municipio de Tecámac.

El presente trabajo cuenta con 6 capítulos, dentro del primer capítulo se revisarán conceptos básicos del magnetismo como momento, energía y flujo magnéticos, las causas del campo magnético, así como sus ecuaciones; también se describirán las propiedades del campo magnético terrestre y sus componentes en cualquier punto sobre la tierra. En el segundo capítulo se darán los conceptos, objetivos y características del geomagnetismo y paleomagnetismo, se describirán algunos de los patrones de la curva de variación secular para distintas regiones de la Tierra, así como la metodología que se utiliza para llevar a cabo un fechamiento arqueomagnético; se dará una descripción de las herramientas empleadas como son los diagramas de Zijderveld, estadística de Fisher y red estereográfica. En el capítulo 3 se presenta el contexto arqueológico del sitio analizado, en este caso, Héroes de Tecámac, Estado de México, así como la ubicación de las muestras arqueomagnéticas analizadas. En el capítulo 4 veremos la metodología que se utilizó para recolectar las muestras arqueomagnéticas, su medición, selección de pilotos para desmagnetización intensiva y en base a estos resultados tratamiento de los demás especímenes. A continuación, mediante el programa Fish1.BAS se obtienen los diagramas de Zijderveld, redes estereográficas y espectros de desmagnetización, para finalmente obtener la dirección característica por espécimen. Todas las direcciones características de los especímenes de cada muestra fueron graficados sobre una red con el fin de observar su comportamiento y poder decidir el tipo de ajuste a emplearse para obtener su dirección media. En el capítulo 5, la dirección media de cada muestra fue comparada con la curva de variación secular. Cinco fechas fueron obtenidas entre 1380- 1550 d.C., el cual es un intervalo temporal aceptable, pues el sitio examinado tuvo una ocupación dentro de los

años 1300- 1600; para dos muestras no fue posible obtener una fecha debido a la gran dispersión mostrada. En el capítulo 6 se muestra el análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 1. La física del magnetismo.

En este capítulo se revisarán algunos conceptos básicos del magnetismo, tales como las causas del campo magnético, momento magnético, flujo magnético, energía magnética, magnetización, susceptibilidad magnética y ecuaciones que lo describen. Posteriormente, se describirá al campo magnético en la superficie terrestre como una aproximación a un potencial escalar, el cual satisface la ecuación de Laplace, se explicará brevemente el significado físico de algunas soluciones a esta ecuación y se describirán las propiedades del campo magnético terrestre. Veremos también, las componentes del vector magnético y cómo es que estas componentes nos describen el campo magnético terrestre en cualquier punto sobre la superficie de la Tierra.

Campo Magnético

Las corrientes eléctricas producen el campo magnético, por lo que podemos definir el campo magnético en términos de la corriente eléctrica.

En la figura 1.1, el campo magnético \vec{H} es perpendicular al flujo de corriente y a un vector radial unitario \mathbf{r} .

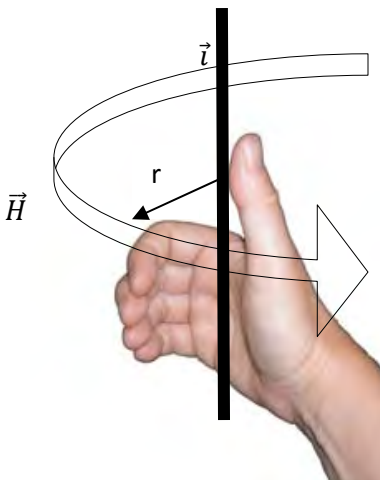


Figura 1.1: Relación del campo magnético con la corriente de un alambre vertical (modificado de Tauxe, 2005).

En la figura 1.1, la magnitud de \vec{H} es proporcional a la fuerza de la corriente \vec{i} , y está dada por la ley de Amperé:

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad (1)$$

La ley de Ampere es más general escribiéndola como una de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo: En un campo eléctrico estático $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_f$ donde \vec{J}_f es la densidad de corriente eléctrica, es decir, la circulación del campo magnético es igual a la densidad de corriente.

Momento magnético

Una corriente eléctrica en un alambre produce un campo magnético que circula alrededor del alambre. Ahora, si doblamos el alambre de manera circular, con un área de πr^2 que transporta una corriente i el campo magnético es el mismo que el campo que se produciría por un imán con un momento magnético \vec{m} mostrado en la figura 1.2.

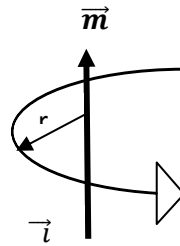


Figura 1.2: El campo magnético de una corriente circular i y área πr^2 es la misma que se produce con un imán con momento \vec{m} (modificado de Tauxe, 2005).

Este momento es creado por la corriente i y depende del área del alambre circular, por lo que:

$$m = i\pi r^2 \quad (2)$$

Y el momento creado por una serie de alambres circulares, es la suma de todos ellos:

$$m = n i \pi r^2 \quad (3)$$

Flujo Magnético

El campo magnético se considera un vector de flujo, pues en cualquier punto del campo tiene dirección y magnitud. Consideremos el campo de una barra imantada, el cual se hace visible por las limaduras de hierro como se muestra en la figura 1.3. La dirección del campo en cualquier punto está dada por vectores, mientras que la intensidad del campo depende de cómo se cierran las líneas de campo unas con otras. Las líneas de campo magnético se conocen como **flujo magnético**. La densidad de las líneas de flujo es una medición de la fuerza del campo magnético: la inducción magnética \vec{B} .

La densidad del flujo magnético puede ser cuantificada cuando un conductor se mueve a través de él. En la inducción magnética se crea una diferencia de potencial con voltaje V en un conductor de longitud l cuando un material conductor se mueve en relación con la inducción magnética \mathbf{B} a una velocidad v (Figura 1.3), por lo que $V=v\mathbf{lB}$.

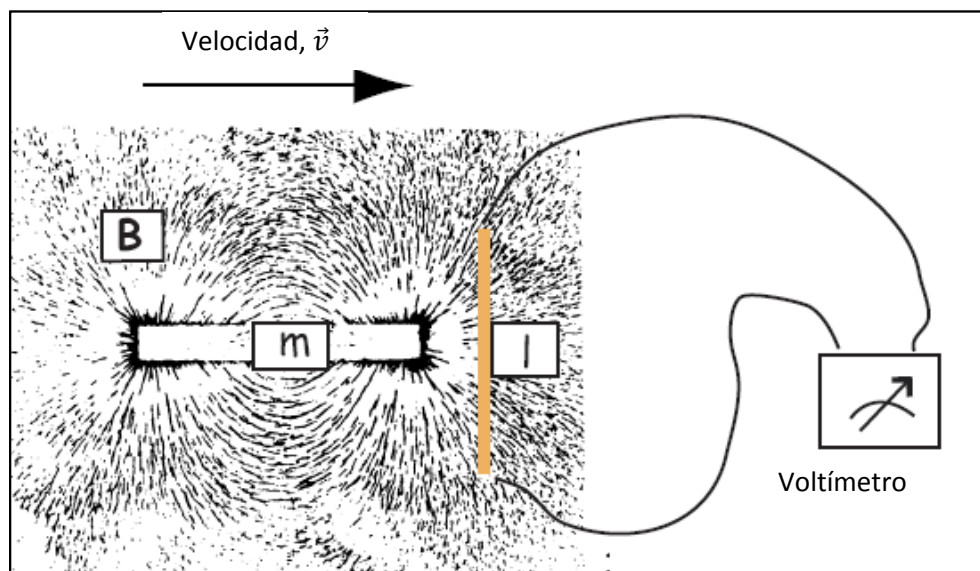


Figura 1.3: Un momento magnético \vec{m} crea un vector de campo \vec{B} , y se hace visible por la limadura de hierro (modificado de Tauxe, 2005).

Otra manera de definir lo anterior, es que la inducción magnética \mathbf{B} o densidad de flujo, esto es, el flujo Φ por unidad de área. Entonces, un incremento del flujo $d\Phi$ es \mathbf{B} veces el campo cuando se incrementa el área $d\mathbf{A}$. El área aquí es la longitud del alambre l veces el desplazamiento ds en el tiempo dt . La velocidad instantánea es $d\mathbf{v}=ds/dt$ y $d\Phi=\mathbf{B}d\mathbf{A}$ y el cambio del flujo es:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \left(\frac{ds}{dt}\right) Bl = vBl = V \quad (4)$$

la ecuación 4 se conoce como la ley de Faraday y es la forma general de la cuarta ecuación de Maxwell.

Energía Magnética

Un momento magnético \vec{m} tiene una energía magneto estática E_m asociada. Esta energía tiende a alinear el compás de las agujas con el campo magnético, como se muestra en la figura 1.4, esta energía está dada por el producto punto $\vec{m} \cdot \vec{B}$ o $mB\cos\theta$, donde m y B son magnitudes del momento \vec{m} y de la inducción \vec{B} magnéticas respectivamente.

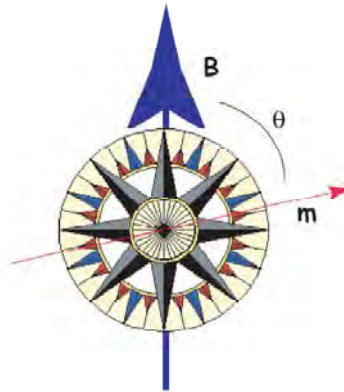


Figura 1.4: El compás de una aguja como ejemplo de un momento magnético \vec{m} tiende a alinearse con el campo magnético \vec{B} (Tauxe, 2005).

Magnetización y susceptibilidad magnética

La magnetización \vec{M} es un momento ya sea por unidad de masa o por unidad de volumen. Las cargas subatómicas, como los protones y electrones, pueden ser pensadas como diminutos circuitos externos y comportarse como pequeños campos magnéticos. Ellos responden a los campos magnéticos externos y dan lugar a la magnetización inducida. La relación entre la magnetización inducida en un material \vec{M}_L y el campo magnético externo \vec{H} se define como:

$$\vec{M}_L = \chi_b \vec{H} \quad (5)$$

El parámetro χ_b es conocido como la susceptibilidad magnética del material, y puede estar en función de la orientación, temperatura, el esfuerzo, la escala de tiempo y el campo aplicado; este factor es tratado frecuentemente como un escalar.

Ciertos materiales pueden producir campos magnéticos en ausencia de campo magnético externo; y se llaman momentos magnéticos espontáneos y son además el resultado de los espines de los electrones, los cuales en algunos cristales actúan de manera coordinada, por lo que producen un campo magnético neto. La magnetización resultante puede ser registrada por diversos mecanismos y puede preservar recuerdos de campos magnéticos antiguos. Esta es la *magnetización remanente* y es la base del paleomagnetismo.

Relación entre \vec{B} y \vec{H}

En paleomagnetismo \vec{B} y \vec{H} hacen referencia al campo magnético; estrictamente hablando, \vec{B} es la inducción y \vec{H} es el campo, la relación entre estas dos cantidades es la siguiente:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (6)$$

donde μ_0 se conoce como "la permeabilidad del vacío" y $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$

El potencial magnético

Una carga eléctrica aislada produce un campo eléctrico, este se origina en la carga $+q$, o fuente, y se extiende hacia afuera, sin regresar a la carga que lo originó, es decir, el campo eléctrico diverge. La divergencia del campo eléctrico se define como $\nabla \cdot \vec{E}$ y cuantifica el flujo de campo eléctrico, esta cantidad es proporcional a la magnitud de la fuente que está aislada. En el caso de un campo alrededor de una carga eléctrica, la divergencia es distinta de cero (Figura 1.5a).

El campo magnético es diferente del campo eléctrico, pues el campo magnético se produce en pares de cargas opuestas o dipolos magnéticos; en este caso cualquier línea de flujo se origina en uno de los polos, yendo al polo de carga opuesta (figura 1.5b), este campo magnético no diverge, esta propiedad es la tercera ley de Maxwell

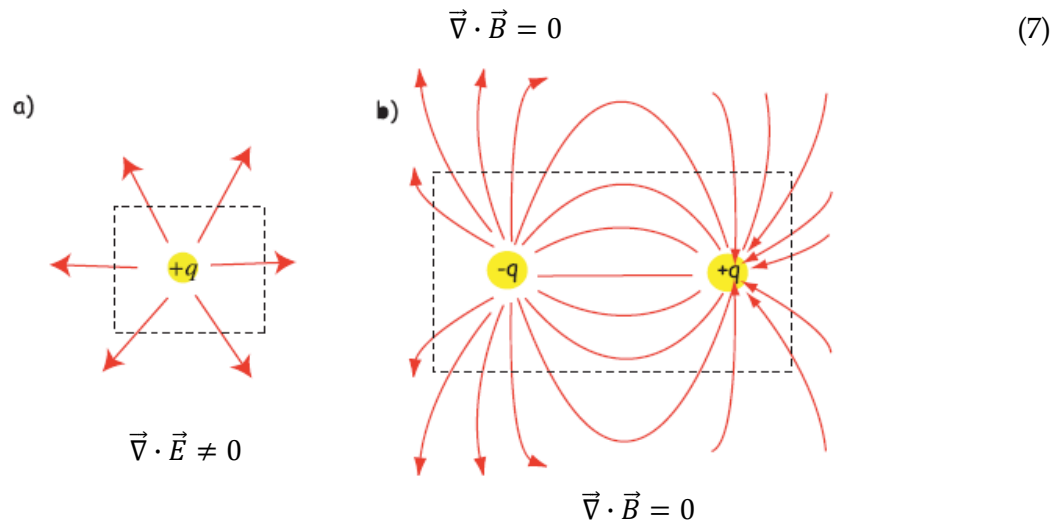


Figura 1.5: a) Divergencia de un campo eléctrico producido por una carga $+q$;

b) Divergencia de un campo magnético producido por un dipolo magnético (modificado de Tauxe, 2005)

Vimos anteriormente, que el rotacional del campo magnético depende de la densidad de corriente, la cual no siempre es cero. Generalmente, el campo magnético no siempre es representado como el gradiente de un campo escalar; pero en el caso de la corriente eléctrica, el campo magnético puede ser escrito como el gradiente de un campo escalar, el cual se conoce como potencial magnético ψ_m , es decir,

$$\vec{H} = -\vec{\nabla}\psi_m \quad (8)$$

La presencia de un momento magnético \mathbf{m} crea un campo magnético, que es el gradiente de un campo escalar. Por otro lado, sabemos que la divergencia de un campo magnético es cero, por lo tanto cumple la ecuación de Laplace: $\nabla^2\psi_m = 0$.

El potencial magnético ψ_m está en función del vector \vec{r} , con distancia radial r y ángulo θ . Dado un momento dipolar \vec{m} , la solución a la ecuación de Laplace para el caso en el que un campo magnético se produce por \vec{m} es

$$\psi_m = \frac{\vec{m} \cdot \vec{r}}{4\pi r^3} = \frac{m \cos \theta}{4\pi r^2} \quad (9)$$

Las componentes radiales y tangenciales de \mathbf{H} en un punto P, como se muestra en la figura 1.6, son

$$H_r = -\frac{\partial \psi_m}{\partial r} = \frac{2m \cos \theta}{4\pi r^3} \quad (10)$$

$$H_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta} = \frac{m \sin \theta}{4\pi r^3} \quad (11)$$

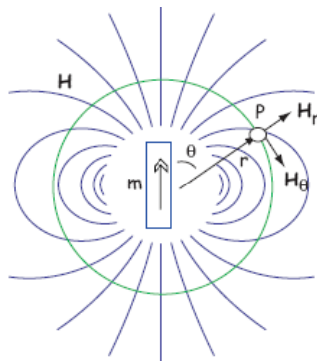


Figura 1.6: Campo H producido en un punto P, con sus componentes tangenciales y radiales (Tauxe, 2005)

El geodínamo.

Las ecuaciones de Maxwell nos dicen que los campos eléctricos y magnéticos están profundamente relacionados. Moviendo un conductor eléctrico a través de un campo magnético, causará un flujo de electrones, generando una corriente eléctrica. En la figura 1.7 se observa el diseño para una máquina que genera energía mecánica dentro de un campo magnético. El disco está hecho de metal, dado que el disco gira en presencia de un campo magnético inicial, los electrones corren perpendicularmente al campo, generando un potencial eléctrico (Figura 1.7b). Hay un flujo de corriente a través del alambre que está dentro de la bobina, generando un campo magnético. Si el disco gira hacia la derecha, el campo magnético tendrá el mismo sentido que el campo inicial, amplificando el efecto y generando un campo magnético más grande.

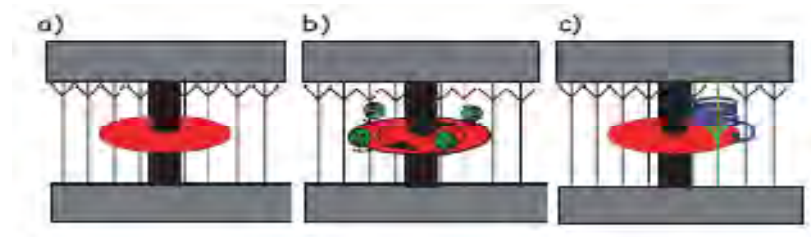


Figura 1.7: a) Un campo inicial es producido por electroimanes. El disco rojo es un plato conductor. b) Cuando el plato conductor rota, las cargas eléctricas se mueven perpendicularmente al campo magnético creando un potencial magnético entre la barra de conducción interna y el borde exterior del plato. c) Cuando el plato conductor es conectado a una bobina cuyas corrientes producen un campo magnético en la misma dirección que el campo inicial, el campo magnético aumenta (Tauxe, 2005).

Campo magnético terrestre

El campo geomagnético o campo magnético terrestre es generado por corrientes de convección en el núcleo exterior fluido de la Tierra, el cual está compuesto por hierro, níquel y otros componentes ligeros, pero desconocidos. Se piensa que la fuente de energía para estas corrientes de convección es en parte por el enfriamiento del núcleo y en parte por las fluctuaciones del fluido de hierro/níquel que se encuentra en el exterior del núcleo, causado por el congelamiento del hierro que se encuentra en el interior del núcleo. Los movimientos de los fluidos en convección son controlados por las fluctuaciones del fluido, el espín de la Tierra y por la interacción del fluido conductor con el campo magnético.

El campo magnético terrestre en la superficie de la tierra puede ser aproximado por un potencial escalar, y por tanto satisface la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 \psi_m = 0 \quad (12)$$

Como es una esfera, la ecuación 12 puede ser escrita en coordenadas esféricas:

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

Para el campo geomagnético, la solución está escrita en términos de un potencial escalar con radio r , co-latitud θ y longitud φ (ecuación 13):

$$\psi(r, \theta, \varphi) = \frac{a}{\mu_0} \sum_{l=0}^{\infty} P_l^m(\cos \theta) \left[\left((g_e)_l^m \left(\frac{r}{a} \right)^l + (g_i)_l^m \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} \right) \cos m\varphi + \left((h_e)_l^m \left(\frac{r}{a} \right)^l + (h_i)_l^m \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} \right) \sin m\varphi \right] \quad (13)$$

Donde g y h son coeficientes gaussianos calculados para un año en particular y están dados en **nano Teslas (nT)**, o unidades de flujo magnético. Los subíndices i y e indican el origen del campo, éste puede ser externo o interno, a es el radio terrestre y P_l^m son los polinomios de Legendre normalizados de acuerdo a la convención de Schmidt.

Si $m=0$ y $l=0$ tenemos simetría axial con un campo dipolar, si $l=2$ representa el cuadrupolo geocéntrico y si $l=3$ el octupolo geocéntrico; su contribución será determinada por los términos g_1^0 , g_2^0 y g_3^0 respectivamente. Los polinomios asociados son los siguientes:

$$P_1^0 = \cos \theta, \quad P_2^0 = \frac{1}{4}(3 \cos 2\theta + 1), \quad P_3^0 = \frac{1}{8}(5 \cos 3\theta + 3 \cos \theta)$$

Si el campo dipolar axial producido por la función armónica P_l^0 fuera rotado con el polo norte apuntando al meridiano de Greenwich, la contribución será determinada por el coeficiente h_1^0 , y si el norte apunta 90° hacia el este, la contribución la determinará el término h_1^1 . Por lo que la contribución total dipolar será la suma del término axial y los dos términos dipolares ecuatoriales: $\sqrt{g_1^0{}^2 + h_1^0{}^2 + h_1^1{}^2}$. La contribución total para cualquier valor de l tiene $2l+1$ términos, esto es $2l$ términos de contribuciones ecuatoriales, y 1 término de contribución axial.

En general, los términos para los cuales la diferencia entre el índice m y el subíndice l es impar, producen campos magnéticos que son asimétricos con respecto al ecuador y si se tiene una diferencia par, se producen campos magnéticos simétricos con respecto al

ecuador. En la figura 1.8a se muestran las inclinaciones producidas por un campo dipolar del mismo signo, las inclinaciones son positivas en el norte y negativas en el sur; las inclinaciones producidas por el campo cuadrupolar (Figura 1.8b) son positivas en los polos y negativa en el ecuador; las inclinaciones producidas por el campo octupolar axial son asimétricas con respecto al ecuador, con signos opuestos en los polos, y en el ecuador.

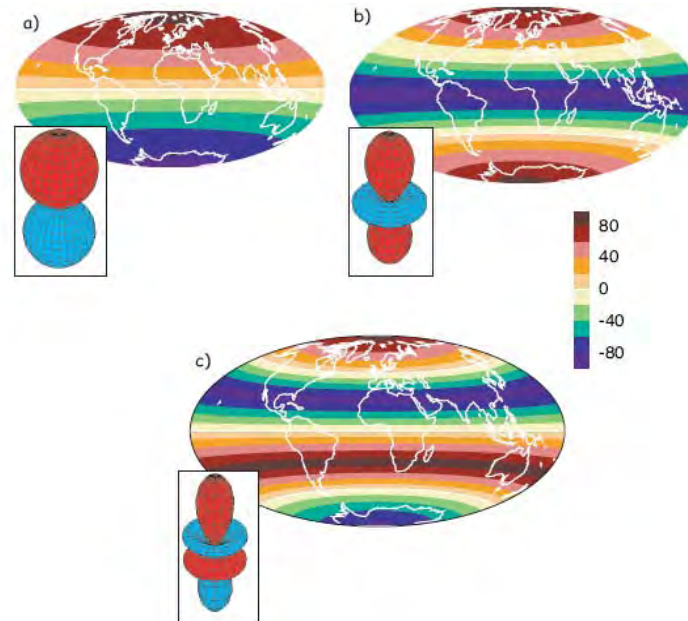


Figura 1.8: a) Dipolo, b) Cuadrupolo, c) Octupolo (Tauxe, 2005).

Componentes del vector magnético

Los tres elementos del vector magnético son la magnitud B , declinación D , inclinación I . Los ejes son denotados como X_1 , X_2 , X_3 , mientras que las componentes de B a lo largo de los ejes son x_1 , x_2 , x_3 . Geográficamente, X_1 apunta hacia el norte, X_2 hacia el este y X_3 está puesto verticalmente apuntando hacia abajo, esto es siguiendo la regla de la mano derecha. Las componentes de B son B_N , B_E , B_V .

De la figura 1.9, podemos ver que:

$$B_H = B \cos I = \sqrt{B_E^2 + B_N^2} \quad \text{y} \quad B_V = B \sin I = x_3 \quad (14)$$

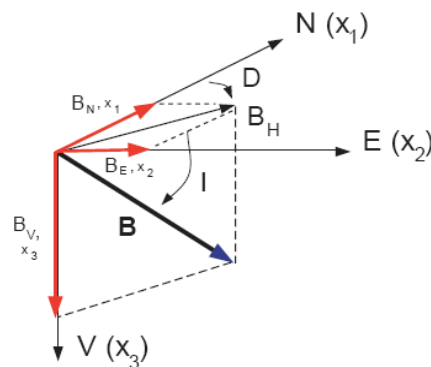


Figura 1.9: Componentes del vector de campo geomagnético, B_H es la proyección del vector B hacia el plano tangente a la superficie de la Tierra y está dentro de las componentes norte B_N y este B_E . B_V es la proyección hacia el eje vertical. D se mide desde el norte en dirección de las agujas del reloj, y tiene un rango de 0° a 360° . I se mide a partir de la horizontal y tiene un rango de -90° a $+90^\circ$ (Tauxe, 2005).

La componente horizontal puede ser proyectada hacia los ejes norte X_1 y este X_2 , esto es:

$$B_N = x_1 = B \cos I \cos D \quad y \quad B_E = x_2 = B \cos I \sin D \quad (15)$$

Si tenemos las coordenadas cartesianas de \mathbf{B} , éstas pueden ser transformadas a los elementos geomagnéticos D , I y B :

$$\begin{aligned} B &= \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \\ D &= \tan^{-1}(x_2/x_1) \\ I &= \sin^{-1}(x_3/B) \end{aligned} \quad (16)$$

Si el campo magnético terrestre fuera solo geocéntrico, axial y dipolar, la declinación sería cero en todos lados. Y no es el caso, por lo que se muestra en la figura 1.10.

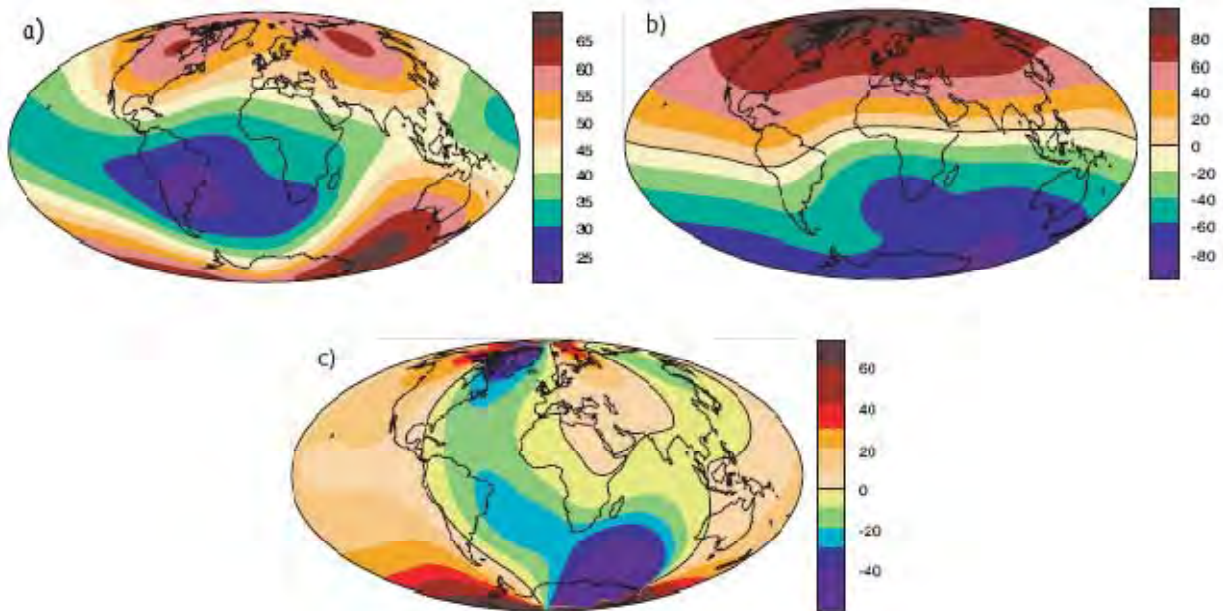


Figura 1.10: Mapas del campo geomagnético de la IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) para 1995. a) Intensidad en μT , b) Inclinación, c) Declinación (Tauxe, 2005).

La ventaja de usar el potencial de campo geomagnético es que el campo vectorial puede ser evaluado en cualquier lugar fuera de la región de origen. En la figura 1.11 podemos observar las líneas de flujo sin el manto, predichas por la IGRF desde 1980. Para este caso, el campo se hace más simple y dipolar, pues se trata de la frontera del núcleo hacia la superficie terrestre.

Uno de los resultados más importantes de tener un dipolo en los armónicos esféricos es que el campo es dominado por el término de primer orden ($l=1$) y las contribuciones secundarias son muy pequeñas. El término de primer orden puede ser pensado como un dipolo geocéntrico que se alinea con 3 diferentes ejes: el eje de rotación (g_1^0), el eje que intercepta al ecuador con el meridiano de Greenwich (h_1^1) y el eje que intercepta al ecuador con el meridiano que está 90° hacia el este.

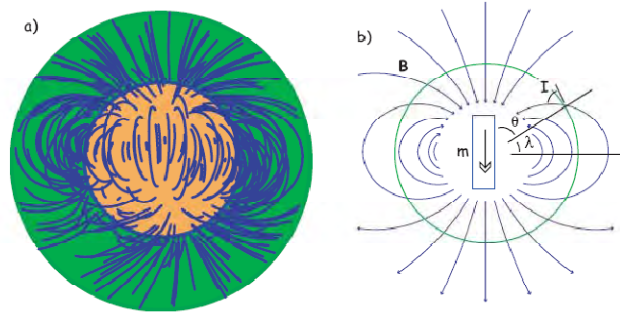


Figura 1.11: a) Líneas de flujo predichas por la IGRF en 1980. b) Orientación de las líneas de campo magnético producidas por un dipolo axial geocéntrico m . λ y θ son la latitud y la colatitud respectivamente. I es la inclinación en un punto en particular sobre la superficie terrestre (Tauxe, 2005)

Propiedades del Campo magnético.

A primer orden, el campo magnético podría ser producido por una gigantesca barra imantada localizada en el centro de la Tierra y alineado con el eje de rotación. En la figura 1.11b se muestra una sección transversal de la Tierra con un campo magnético dipolar superpuesto. Si el campo fuera geocéntrico, axial y dipolar, no importaría la sección transversal de la Tierra que se escogiera por que las líneas de campo magnético apuntarían siempre al norte. El ángulo entre las líneas de campo y la horizontal en la superficie de la Tierra (Inclinación I), variaría entre 0° y 90° . Además, las líneas de campo magnético estarían más juntas en los polos que en el ecuador, dando como resultado un campo dipolar, el cual tendría el doble de la intensidad del campo ecuatorial. Pero cuando se hace un promedio a través del tiempo, el campo geomagnético actual, en promedio, se asemeja a un campo geocéntrico, axial y dipolar (*GAD*).

El vector suma de los dipolos geocéntricos (g_1^0 , h_1^0 , h_1^1 en el IGRF) es un dipolo que está actualmente inclinado 11° con respecto al eje de rotación. En la figura 1.12 los puntos son llamados *polos geomagnéticos*. Los puntos en donde el campo es vertical ($I = \pm 90^\circ$ mostrado por un triángulo en la figura 1.12) son llamados polos magnéticos. Estos polos se distinguen de los *polos geográficos* donde el eje de rotación de la Tierra intercepta a la superficie. El polo norte geográfico se muestra como un punto en la figura 1.12. Promediando los polos magnéticos antiguos de al menos 100,000 años obtenemos lo que se conoce como un *polo paleomagnético*.



Figura 1.12: Los diferentes polos magnéticos. El triángulo es el Polo Norte, donde el campo está hacia abajo ($I=90^\circ$). El rombo es el polo norte geomagnético, donde el eje de rotación atraviesa la superficie. El punto es el Polo norte. La línea punteada es el ecuador magnético, donde $I=0$ (Tauxe, 2005)

Polos geomagnéticos virtuales (VGP).

Nos interesa saber si el polo geomagnético ha cambiado o si un lugar en particular ha rotado con respecto al polo geomagnético. Sin embargo, lo que observamos en un lugar es la dirección local del vector de campo. Por lo que se necesita una manera de transformar una dirección observada en el polo geomagnético equivalente. Con el fin de eliminar la dependencia de dirección solo en posición en el globo terráqueo, se imagina un dipolo geocéntrico, el cual nos dará la *altura* de la dirección del campo observado a una latitud (λ) y longitud (φ) dada. El polo geomagnético virtual es el punto sobre el globo terráqueo que corresponde al el polo geomagnético del dipolo imaginario (Figura 1.13).

En paleomagnetismo, la convención es la siguiente: φ se mide en dirección hacia el este desde el meridiano de Greenwich y va de 0° a 360° . θ es medido desde el polo norte y va de 0° a 90° . θ se relaciona con la latitud λ de la siguiente manera: $\theta = 90 - \lambda$. θ_m es la magnitud de la colatitud y está dada por la siguiente ecuación:

$$\cot \theta_m = \frac{1}{2} \tan I \quad (17)$$

El primer paso para calcular el VGP es determinar la colatitud θ_m utilizando la ecuación 17 denominada ecuación del dipolo. La declinación D es el ángulo que va desde el polo norte geográfico a la curva que une a S y a P , y $\Delta\varphi$ es la diferencia de longitudes entre P y S , $\varphi_p - \varphi_s$.

Se puede localizar al VGP usando las leyes de senos y cosenos. La declinación D es el ángulo que va desde el polo norte geográfico a la curva que una a S y a P , por lo que:

$$\cos \theta_p = \cos \theta_s \cos \theta_m + \sin \theta_s \sin \theta_m \cos D \quad (18)$$

La cual nos permite calcular la colatitud θ_p del VGP. La latitud del VGP está dada por:

$$\lambda = 90 - \theta_p \quad (19)$$

Por lo que $90^\circ > \lambda > 0^\circ$ en el hemisferio norte y $0^\circ < \lambda < 90^\circ$ en el hemisferio sur.

Para determinar φ_p se calcula primero la diferencia angular entre el polo y la longitud $\Delta\varphi$

$$\sin \Delta\varphi = \sin \theta_m \cdot \frac{\sin D}{\sin \theta_p} \quad (20)$$

si $\cos \theta_m \geq \cos \theta_s \cos \theta_p$, entonces $\varphi_p = \varphi_s + \Delta\varphi$. Pero si $\cos \theta_m < \cos \theta_s \cos \theta_p$, entonces $\varphi_p = \varphi_s + 180 - \Delta\varphi$. Ahora es posible convertir las direcciones de la figura 1.14b a VGP's, el conjunto de puntos en la figura 1.14a están más juntos que en la proyección de áreas iguales, ya que el efecto de la variación de la latitud en el campo dipolar puede ser removido.

Si varios VGP's se promedian juntos, la posición del polo promedio es llamada "polo paleomagnetico".

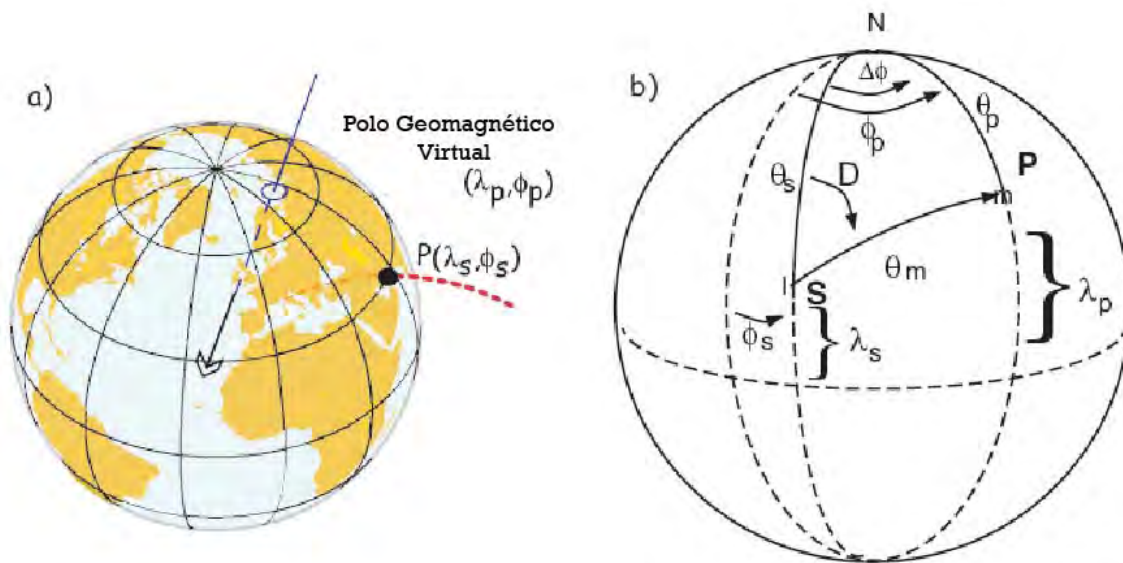


Figura 1.13: Transformación de una dirección con posición del polo geomagnético virtual P hacia S . a) Ilustración de las líneas de campo magnético observadas en la posición P y es el VGP. b) El sitio S tiene latitud λ_s y longitud ϕ_s y dirección de campo magnético D, I . La colatitud de S es θ_s , $\Delta\phi$ es la diferencia en longitudes entre S y P y θ_p es la colatitud de P . la colatitud de S con respecto a P es la colatitud magnética θ_m . N es el polo norte geográfico (modificado de Tauxe, 2005)

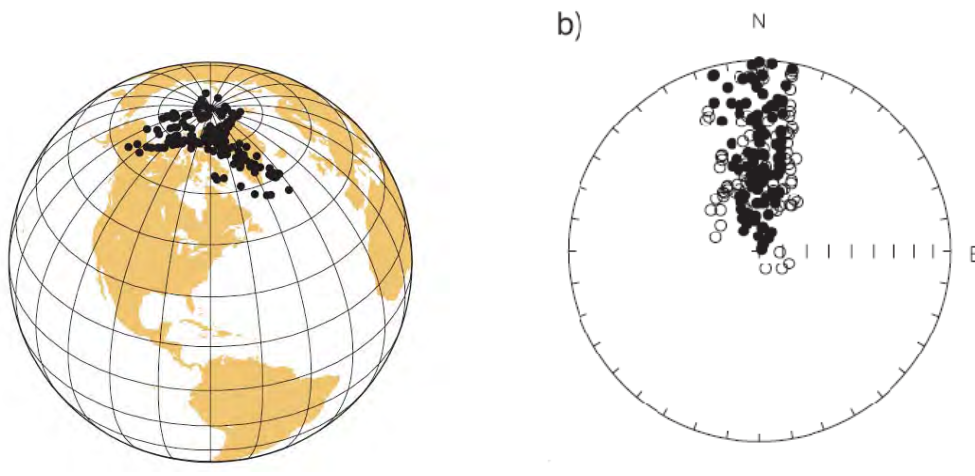


Figura 1.14: Posiciones del VGP convertidas, tomadas de las direcciones de la figura a). (Tauxe, 2005).

Capítulo 2. Archeomagnetismo

Geomagnetismo.

El geomagnetismo es la rama de la geofísica que se encarga de estudiar el campo magnético terrestre. Se estudia principalmente la morfología del campo, su variación secular y su origen.

El campo magnético puede ser descrito en cualquier punto sobre la superficie terrestre por un vector indicando la dirección y la intensidad del campo. Como se vio en el capítulo 1, este vector puede ser descrito por 3 elementos: declinación, inclinación e intensidad del campo. La declinación es el ángulo D entre el norte geográfico y la componente horizontal del vector de campo magnético (Figura 2.1). La inclinación I es la pendiente del vector total de campo con respecto a la horizontal. La intensidad del campo es la magnitud del vector total de campo.

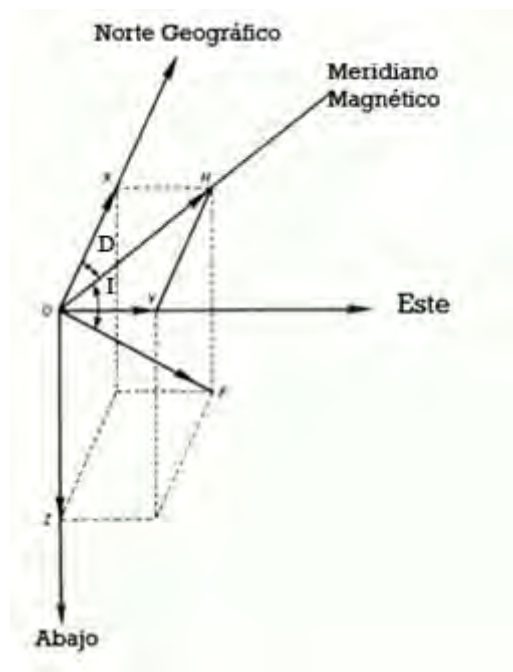


Figura 2.1: Los elementos utilizados para describir la magnitud y la dirección del campo magnético en cualquier punto de la superficie terrestre (modificado de Eighmy, 1990).

La intensidad de un campo geomagnético típico es de $50\mu\text{T}$ y puede ser comparada con un campo encontrado cerca de un pequeño imán de cerámica, el cual tiene una intensidad de $2000\mu\text{T}$. La declinación e inclinación magnética, y la intensidad total del campo en los mapas de contorno (Figura 2.2, 2.3 y 2.4), indican lo mucho que el campo puede ser atribuido a un campo dipolar, que es también la forma del campo característico que se tiene alrededor de un imán de barra. El campo dipolar está completamente especificado por la orientación de los ejes y la intensidad del momento dipolar. Si el eje dipolar fuera paralelo al eje de rotación de la Tierra, las líneas de contorno para la inclinación y la intensidad total del campo serían paralelas a las líneas de latitud, y la declinación sería de 0° en todos los lugares. La inclinación variaría de -90° (vertical y apuntando hacia afuera) en el polo sur geográfico a 0° (horizontal) en el ecuador y a $+90^\circ$ (vertical y apuntando hacia el interior) en el polo norte geográfico. La intensidad del campo sería el doble de intensidad en los polos como en el ecuador. La desviación del campo real de este modelo se debe en parte al hecho de que el mejor ajuste se hace por un dipolo que tiene una

inclinación de 11° con respecto al eje de rotación, cortando la superficie de la Tierra en coordenadas: 79°N , 109°W en el hemisferio norte. El momento dipolar presente es de $7.9 \times 10^{22} \text{ Am}^2$.

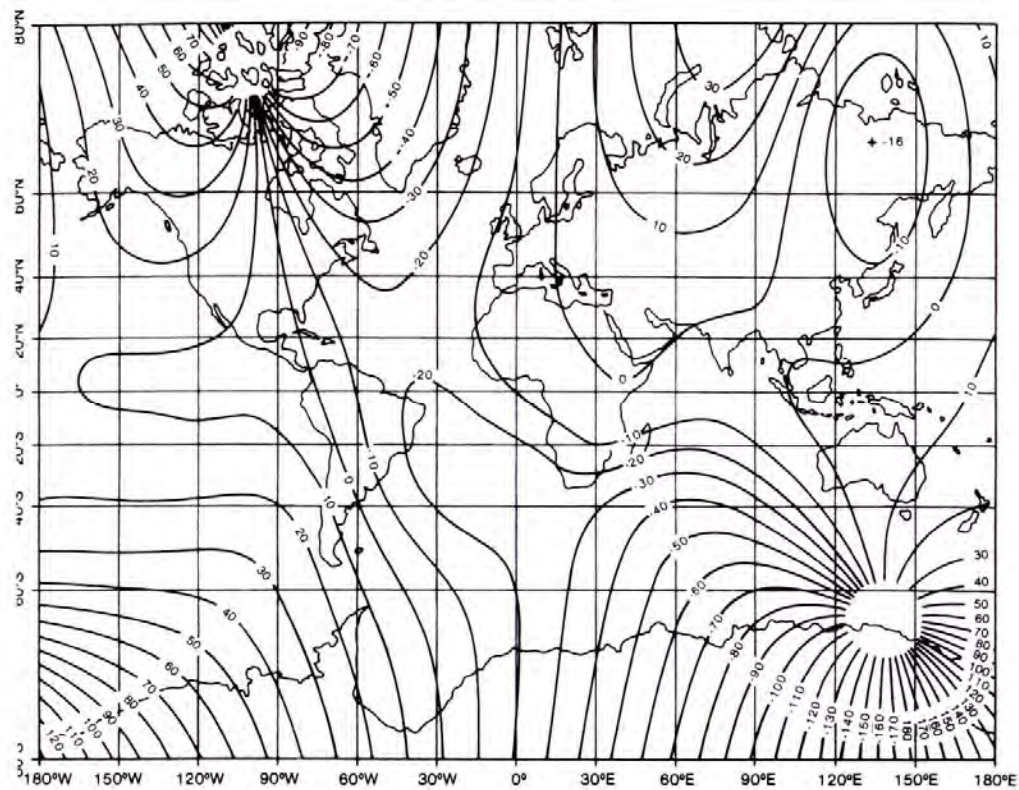


Figura 2.2: Mapa de contorno de la inclinación magnética para el año de 1980 (Eighmy, 1990).

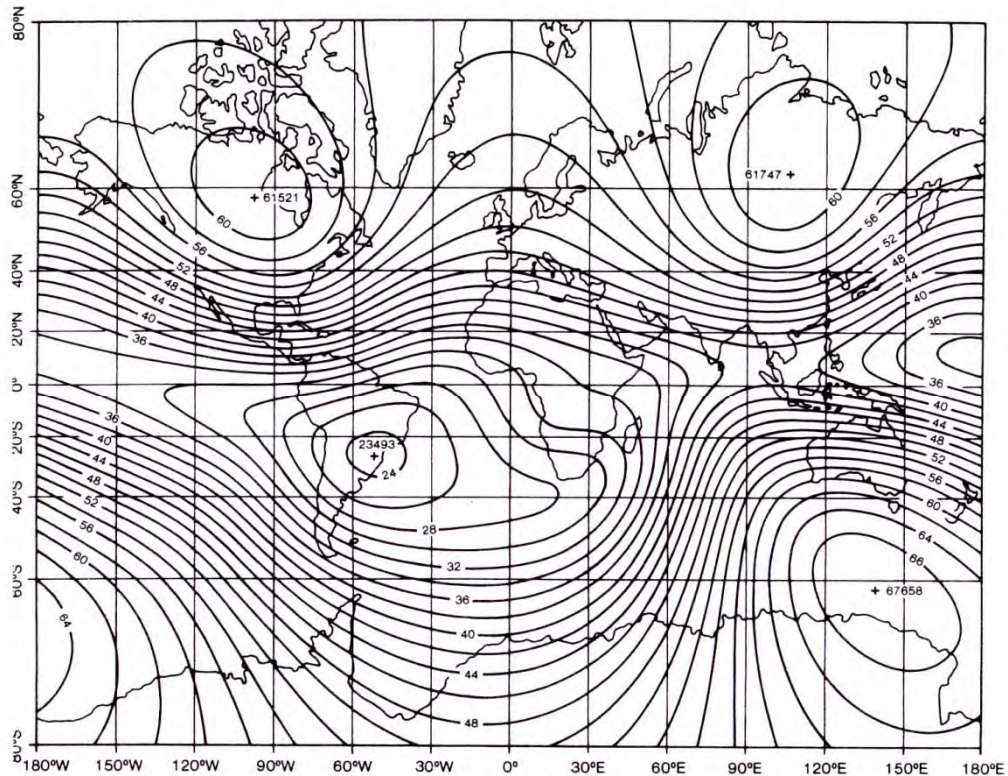


Figura 2.3: Mapa de contorno de la intensidad magnética total para el año de 1980, en nT (Eighmy, 1990).

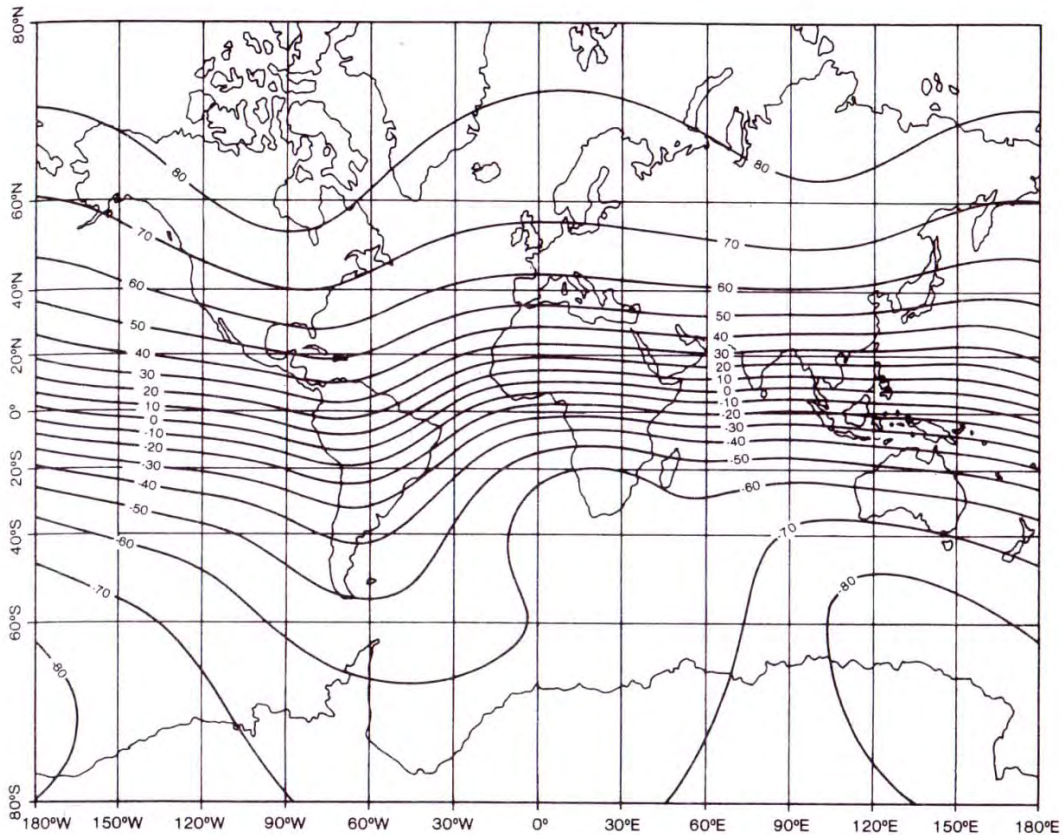


Figura 2.4: Mapa de contorno de la inclinación magnética para la época de 1980 (Eighmy, 1990)

El patrón dipolar se perturba por una componente no dipolar del campo magnético. Esto es solo la parte izquierda del campo después de que el mejor ajuste dipolar se ha eliminado. El campo no dipolar causa perturbaciones regionales del campo dipolar. Por lo que a nivel global del patrón dipolar en el campo magnético y no dipolar regional, se observan variaciones. Estos patrones pueden ser descritos en gran detalle por el campo terrestre actual, utilizando mediciones directas de los observatorios magnéticos y satélites. El campo dipolar y no dipolar son representados matemáticamente por un análisis de armónicos esféricos, como se vio en el capítulo 1.

La diferencia entre dos vectores magnéticos a partir de dos sitios geográficos se produce debido a los campos dipolar y no dipolar. Esta diferencia puede ser corregida calculando polos geomagnéticos virtuales (VGP), o transformando direcciones a un sitio común a través de sus VGP's, esto es una transformación matemática que traslada la declinación y la inclinación en un sitio dado dentro de las coordenadas geográficas del eje dipolar equivalente. El término virtual indica que este polo es diferente del mejor ajuste de eje dipolar, el cual es determinado usando un conjunto de datos globales. Incluso después de esta transformación, los VGP's de diferentes sitios difieren por la existencia del campo no dipolar. En el año de 1970, Shuey encontró que para la época de 1965, hay 2 direcciones transformadas a través del VGP que difieren por 0.29° para cada grado de separación geográfica en los sitios con dirección norte-sur, y también difiere por 0.15° por cada grado de separación geográfica en sitios con dirección este-oeste. Este es el motivo por el cual es necesario recopilar nuevos registros arqueomagnéticos para regiones separadas por distancias sobre las cuales el campo no dipolar muestre un cambio apreciable. Si la precisión para una dirección arqueomagnética es alrededor de 5° , las figuras anteriores

sugieren que dado un registro es más usual una distancia de alrededor de 2000 km. desde el centro de una región dada.

El campo magnético sufre tanto variaciones temporales como espaciales. El cambio temporal del campo interno, con escalas de tiempo de décadas a varios milenios, es llamado *variación secular*. Tanto la intensidad y la dirección del cambio total del campo es debida a la intensidad y dirección tanto del dipolo y el no dipolo. Consecuentemente, se tiene una signatura global a la variación secular, pero también se tienen importantes diferencias regionales. Los patrones de variación secular son fácilmente obtenidos de observaciones directas del campo en diferentes localidades. En la figura 2.4 se muestra el registro más largo de la variación secular basado directamente en las mediciones de campo. Durante el periodo de 1600 a 1950, la inclinación cerca de Londres tuvo una variación de 8° , y la declinación varió por 35° .

Hay dos modelos de variación secular a lo largo de la historia. El primero está dirigido hacia el oeste del campo no dipolar a un ritmo de alrededor $2^\circ/\text{año}$. Esto se ha visto en los mapas de campo no dipolar para diferentes épocas, pues los puntos más altos en el campo no dipolar se acumula notablemente hacia el oeste con el paso del tiempo. La dirección de los puntos más altos acumulados puede ser inferida por los registros de variación secular derivados en un solo sitio. Cuando se utiliza Bauer (1896) las gráficas para las direcciones de intensidad vs. declinación, como en la figura 2.5, para Londres, o las gráficas de los polos geomagnéticos virtuales de los mismos datos, una curva con sentido en las manecillas del reloj, generalmente indica una fuente que se acumula hacia el oeste (Dodson 1979).

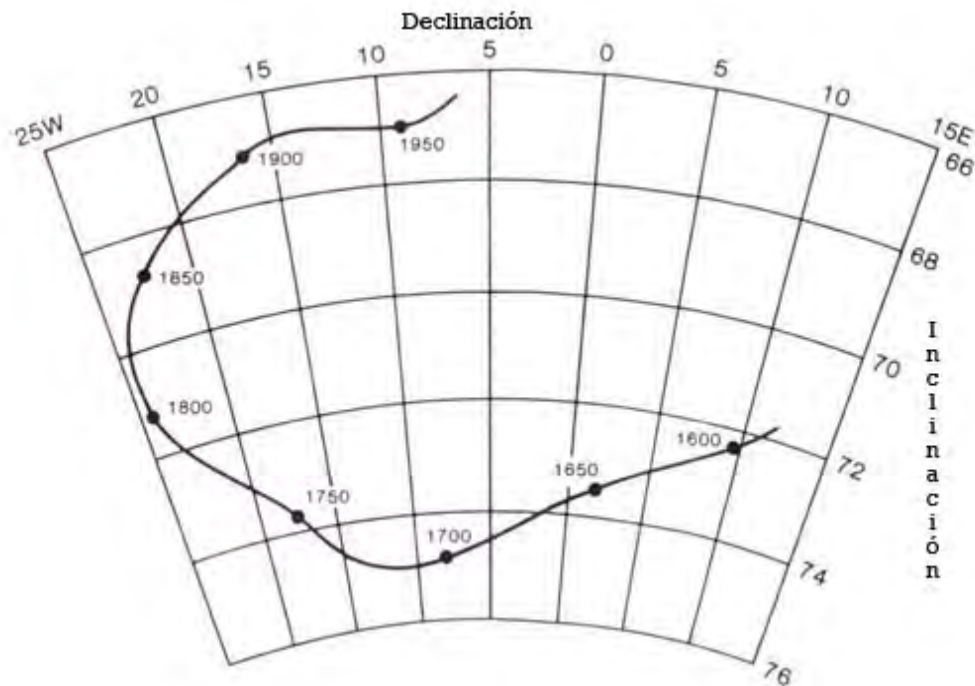


Figura 2.5: Dirección del campo geomagnético en Londres, con intervalos de tiempo de 50 años (modificado de Eighmy, 1990).

El segundo patrón dominante en la curva de variación secular es la disminución casi lineal, del 8%, en los últimos 150 años. El eje dipolar tiene también una acumulación hacia

el oeste, y las características del campo no dipolar han ido creciendo y decayendo con el paso del tiempo (Figura 2.6). Los datos arqueomagnéticos son fundamentales para determinar si los patrones recientes o los diferentes modos de variación secular son evidentes para los tiempos prehistóricos.

El último objetivo del geomagnetismo es entender el origen del campo magnético. Aunque esto fue un misterio hace 40 años, los geofísicos no creían que la teoría de la dinamo pudiera explicar la existencia y el comportamiento del campo. De acuerdo con esta teoría, el campo magnético está en una regeneración continua debido a las interacciones electromagnéticas entre el campo y el fluido conductor eléctrico en el núcleo exterior de la Tierra. La teoría de la dinamo geomagnética, sin embargo, es extremadamente compleja y todavía no es capaz de predecir a detalle el comportamiento del campo magnético. El análisis de McFedden (1984) en paleo-intensidades sugiere un tiempo constante para el momento dipolar de 20,000 años. Por observaciones en parámetros físicos del núcleo de la Tierra, Yukutake (1968) calculó un decaimiento libre de tiempo de campo no dipolar que puede ser tan largo como 7,000 años. Como un complemento del trabajo de los teóricos, los datos en la variación secular durante el pasado (unos cuantos cientos de años) tienen el potencial para contribuir mucho en el entendimiento del proceso de la dinamo.

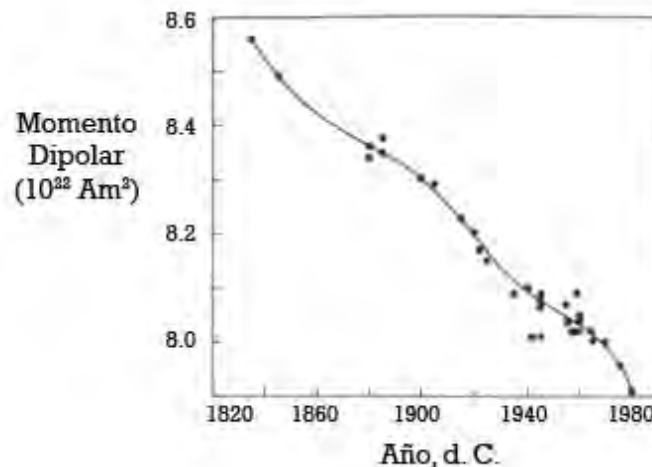


Figura 2.6: Decaimiento reciente del momento dipolar, mostrando determinaciones y tendencias individuales (modificado de Eighmy, 1990).

Magnetismo en rocas.

Los materiales ferromagnéticos son capaces de retener una magnetización remanente, incluso después de que el campo magnético que causa la magnetización sea removido. Una magnetización remanente estable actúa como una grabación magnética del antiguo campo magnético terrestre, aunque se piense que el campo ha cambiado en dirección y magnitud. El magnetismo en rocas abarca el estudio de minerales ferromagnéticos, la física de cómo los granos de estos minerales se magnetizan, y el proceso por el cual las rocas adquiere la magnetización remanente. Un conocimiento del magnetismo de las rocas es necesario para una interpretación adecuada de resultados paleomagnéticos. Por ejemplo, los minerales transportan una magnetización remanente y las maneras por la cual adquirieron esa magnetización pueden sugerir qué eventos en la historia geológica de las rocas causó la magnetización adquirida. Esto nos dice que la dirección del campo

paleomagnético varía durante el tiempo de vida de la roca, y la dirección grabada depende de la cronología de los eventos de cuando ocurrió la grabación.

En arqueomagnetismo se utilizan cerámicas y objetos de arcilla que eran utilizados en los hogares. La remanencia en estos objetos es típicamente una magnetización termo-remanente (TRM) adquirida durante un evento de calentamiento a cientos de grados Celsius. El calentamiento por encima de la temperatura de Curie en los minerales ferromagnéticos borra completamente toda la remanencia y conduce a la adquisición de una magnetización termo-remanente total. Por otro lado, el calentamiento con temperaturas menores a la temperatura de Curie no puede borrar las remanencias anteriores y resulta en una adquisición parcial de magnetización termo-remanente (PTRM). La TRM actual se estabiliza en un grano en particular solo después de que se haya enfriado a través de una temperatura de bloqueo, la cual es menor o igual a la temperatura de Curie, dependiendo de la forma y tamaño del grano. Si el último calentamiento de la pieza arqueomagnética fue por encima de la temperatura de Curie, se tiene una magnetización primaria. Sin embargo, si la pieza ha tenido repetidos calentamientos por debajo de la temperatura de Curie, la magnetización total puede representar el efecto de la suma de los calentamientos.

Cuando un espécimen es llevado al laboratorio, su magnetización remanente natural (NRM) es el vector suma de la magnetización primaria, adquirida al momento de su formación, y las magnetizaciones secundarias. Una remanencia química (CRM) puede ser adquirida si ocurren alteraciones químicas en la mineralogía magnética. Los rayos pueden producir una remanencia iso-termal (IRM) o anisterética (ARM).

Los minerales magnéticos más importantes en rocas y herramientas arqueológicas son la magnetita y hematita. Sus temperaturas de Curie son 580°C y 680°C respectivamente. Estos materiales son actualmente los últimos miembros de las soluciones sólidas de los minerales de titanio- magnetita y titanio- hematita. Las titanio- magnetitas pueden oxidarse hacia la serie de titanio hematita, por lo que la región del Fe- Ti- O (región achurada de la figura 2.7). La pieza y el tamaño de los granos, así como la mineralogía, puede tener un efecto significativo en las propiedades magnéticas.

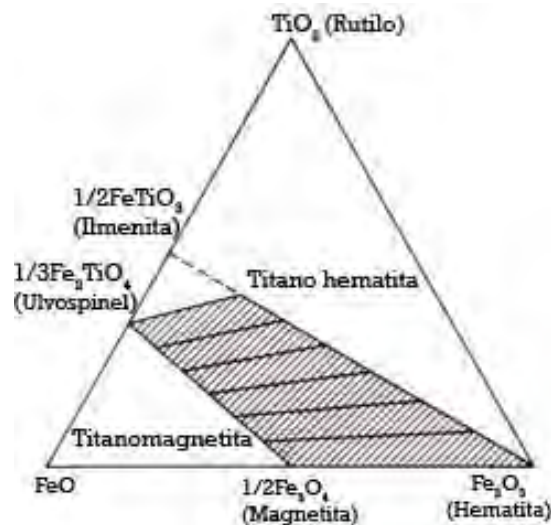


Figura 2.7: Diagrama para el sistema de Fe- Ti-O (modificado de Eighmy, 1990).

Paleomagnetismo.

El paleomagnetismo es el estudio del campo magnético terrestre antiguo. Este estudio ha sido posible debido a que las rocas pueden actuar como registros magnéticos. El magnetismo de las rocas puede ser estable más allá de un tiempo geológico, incrementando la cobertura temporal del campo magnético terrestre por un factor de *alrededor de 10 millones de años más allá de los datos que se han observado*. La dirección del campo paleomagnético puede ser determinada a partir de los especímenes orientados de el sitio de la roca. Aunque las investigaciones paleomagnéticas han tratado con direcciones, las paleo intensidades (intensidad del campo magnético antiguo) pueden ser determinadas también. Es necesario una buena cobertura geográfica del campo paleomagnético para examinar la morfología de los campos dipolares y no dipolares.

Los estudios paleomagnéticos nos han brindado un esquema más completo de la naturaleza de la variación secular. Las variaciones del campo geomagnético nos pueden mostrar los cambios en otros parámetros físicos.

Una particularidad del comportamiento paleomagnético es la inversión magnética de la polaridad en la variación secular, si el campo dipolar se invierte 180° , el norte magnético se convierte en el sur magnético y viceversa. La última inversión ocurrida fue hace 700,000 años.

El *arqueomagnetismo* puede ser clasificado como una rama del paleomagnetismo. Y puede ser usado para extender nuestro conocimiento de la variación secular en un tiempo prehistórico. El registro de la variación secular ha sido *determinado independientemente de las características de las fechas*, y sirve como referencia o como patrón para los datos arqueomagnéticos.

Metodología paleomagnética.

Los pasos involucrados en cualquier estudio paleomagnético son la colección de muestras, las mediciones en el laboratorio y el análisis estadístico. La colección local en paleomagnetismo es llamado *sitio*, y representa un instante en un tiempo geológico. Un número independiente de especímenes orientados son recolectados para cada sitio. La orientación de las muestras se hace con una brújula, la cual nos brinda las coordenadas geográficas del sitio. Con la orientación del espécimen, las coordenadas de la dirección de la magnetización relativa del espécimen se pueden transformar en el laboratorio a direcciones magnéticas relativas a las coordenadas geográficas en el campo terrestre.

Si las características se han mantenido en el sitio desde que la magnetización fue adquirida, este a su vez representa la dirección del campo arqueomagnético.

La magnetización es medida en el laboratorio con un magnetómetro de giro. En los laboratorios se *procede* a limpiar la pieza usando desmagnetización de campos alternos (AF). Este procedimiento tiene como objetivo remover las componentes secundarias de magnetización adquiridas por la muestra subsecuente a la original, componente primario. Los componentes secundarios deben ser removidos para revelar las direcciones de los componentes primarios, los cuales son probablemente paralelos a la dirección arqueomagnética de interés. En la desmagnetización por campos alternos, la muestra es sujeta a un campo magnético sinusoidal con una envolvente que decae linealmente a cero.

Para evaluar la estabilidad magnética de la remanencia, es necesario someter al menos a un espécimen piloto a una desmagnetización progresiva en un cierto número de campos alternos crecientes. La remanencia se vuelve a medir después de cada paso. Los resultados de la desmagnetización son graficados en un diagrama de Zijdeveld, como el que se muestra en la figura 2.8. Este diagrama combina intensidad y cambios en la dirección. El punto final del vector de desmagnetización es proyectado como dos puntos en dos planos ortogonales: el plano vertical que contiene al vector $\sqrt{x^2 + y^2}$, y el plano vertical que contiene al vector $x\sqrt{x^2 + y^2}$ o $y\sqrt{y^2 + z^2}$, donde x, y, z son las componentes referidas a los ejes coordenados:

$$x = M \cos I \cos D \quad (1)$$

$$y = M \cos I \operatorname{sen} D \quad (2)$$

$$z = M \cos I \quad (3)$$

El Norte se representa con la coordenada x , el Sur con la coordenada $-x$, el Este y Oeste con las coordenadas y y $-y$ respectivamente. La distancia al origen es proporcional a la intensidad, por lo que en el proceso de desmagnetización se formarán trayectorias sobre los planos de acuerdo con los cambios en la declinación, inclinación e intensidad.

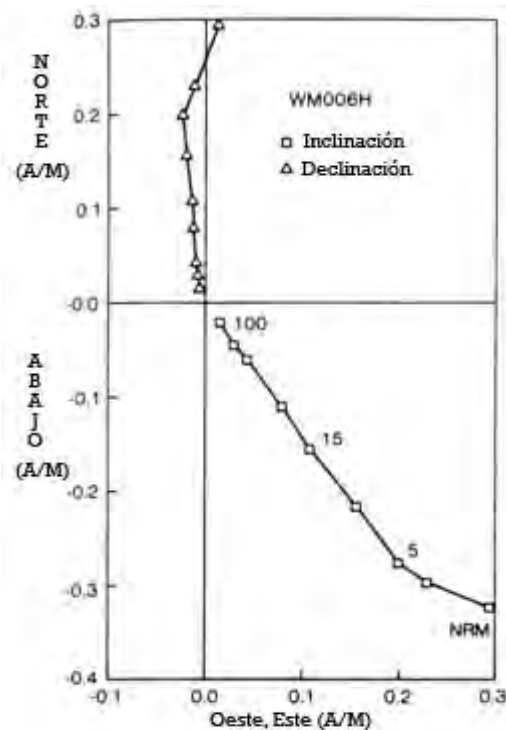


Figura 2.8: Diagrama de Zijdeveld modificado. La dirección cambia por encima de la desmagnetización inicial, se estabiliza por la segunda desmagnetización y sigue siendo estable hasta el último paso (modificado de Eighmy, 1990).

Los resultados de los especímenes pilotos son utilizados para seleccionar los pasos de desmagnetización óptima en los cuales los especímenes restantes deben ser desmagnetizados. Posteriormente, para cada espécimen se ajusta la mejor recta tendiente al origen y de allí la dirección característica.

En 1953, Fisher desarrolló un método estadístico especial para trabajar con las direcciones, las cuales son cantidades vectoriales que obedecen diferentes distribuciones para

cantidades escalares. La distribución Fisher es una distribución normal pero sobre la superficie de una esfera.

Esta distribución ve a las direcciones de los vectores MRN de varios especímenes como puntos en la superficie de una esfera unitaria, con cada una de las direcciones con peso unitario.

La función de densidad Fisher $P_{dA}(\theta)$ da la probabilidad por unidad de área angular de encontrar una dirección dentro del área dA centrada a un ángulo θ de la media verdadera. El área angular se expresa en estereorradianes, y el área total de la esfera unitaria son 4π estereorradianes. Las direcciones se encuentran distribuidas de acuerdo con la función de densidad de probabilidad:

$$P_{dA}(\theta) = \frac{k}{4\pi \sinh(k)} e^{k \cos \theta} \quad (4)$$

Donde θ es el ángulo a la dirección verdadera, en este caso es cero, y k es el parámetro de precisión; esto es una medida de la concentración de la distribución alrededor del valor medio, creciendo a mayor concentración (Soler, 2006).

En las ecuación 16 del capítulo 1 tenemos los elementos del vector magnético: B, D, I , en términos de las coordenadas x_1, x_2, x_3 , (cosenos directores) por lo que las direcciones media pueden calcularse con las siguientes ecuaciones:

$$D = \tan^{-1} \frac{\sum x_{2i}}{\sum x_{1i}}$$

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

$$I = \frac{\sin^{-1} \sum x_{3i}}{R} \quad (5)$$

La estadística de Fisher calcula una dirección promedio que es caracterizada por el parámetro k y el a_{95} un intervalo de confianza de 95%. Este intervalo de confianza tiene un ángulo de a_{95} grados alrededor de la media del vector director y lo traza como un círculo de radio a_{95} sobre la red (Figura 2.9). Una mejor precisión se refleja si se tiene un valor grande para k y un valor pequeño para a_{95} .

Fisher demostró que la estimación del parámetro de precisión k es:

$$k = \frac{N-1}{N-R} \quad (6)$$

Donde N es el número de muestras. Y el ángulo a_{95} se aproxima de la siguiente manera:

$$a_{95} \approx \frac{140^\circ}{\sqrt{kN}} \quad (7)$$

Las direcciones son a menudo graficadas en proyecciones estereográficas, con una declinación de 0° a 360° alrededor del perímetro de la red, y la inclinación se grafica de 0° a 90° hacia el interior de las red. La media de la dirección de los vectores, al igual que la dirección individual de cada muestra, son graficadas como un punto sobre la red estereográfica.

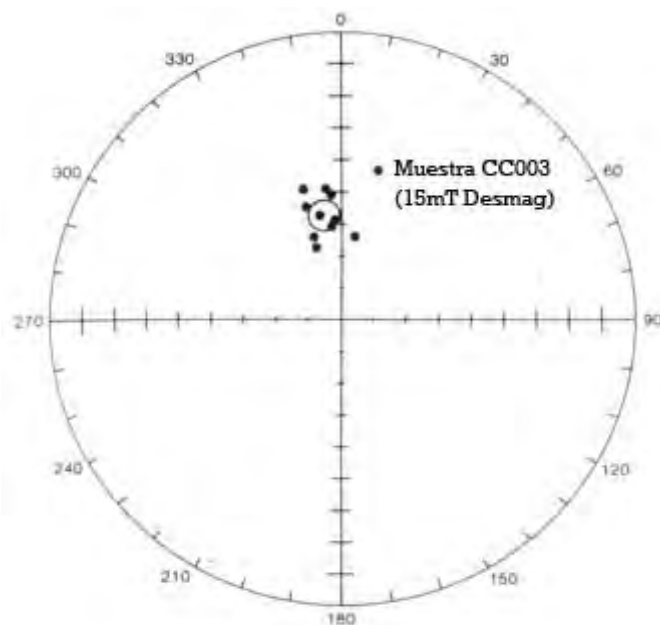


Figura 2.9: Proyección estereográfica de direcciones arqueomagnéticas. Los círculos oscuros representan direcciones de magnetización para especímenes individuales. El círculo transparente representa la dirección característica de la muestra (modificado de Eighmy, 1990).

Capítulo 3: Contexto arqueológico.

Se examinaron muestras del asentamiento arqueológico denominado por el Proyecto Héroes de Tecámac I, en Tecámac, Estado de México, este proyecto de excavación se llevó a cabo por la Arqueóloga Nadia Vélez Saldaña. El sitio se localiza al noroeste de la Cuenca de México, entre el Gran Canal y la carretera Texcoco- Lechería, en el municipio de Tecámac, Estado de México. El área a estudiar está ubicada al este entre las coordenadas UTM 494411 y 497179, y al norte entre las coordenadas UTM¹ 2168615 y 2171722 (Figura 3.1) (Vélez, 2009).

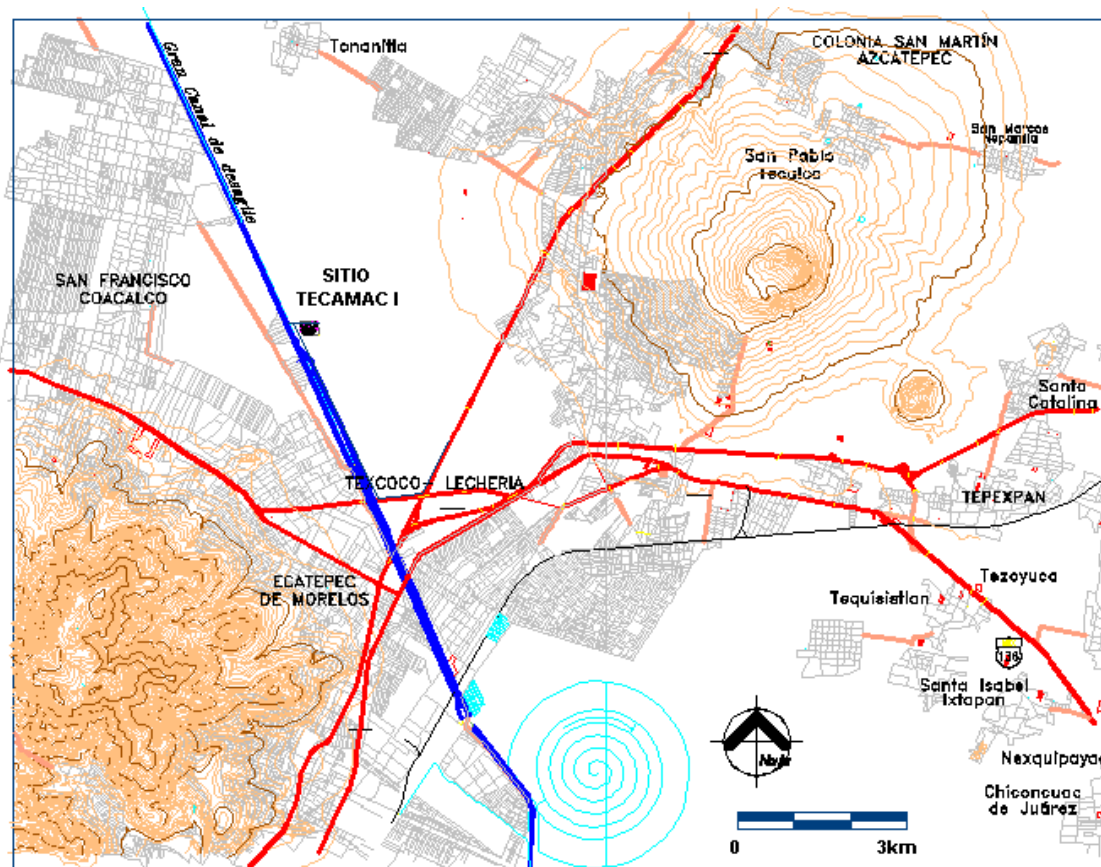


Figura 3.1: Ubicación general del área de desarrollo urbano, Héroes de Tecámac, Tecámac, Estado de México (Vélez, 2009).

A continuación se dará una breve historia cultural de la región en la que se encuentra el asentamiento arqueológico de Tecámac:

Los primeros grupos que se establecieron en la región de Ecatepec fueron asentamientos del periodo Preclásico tardío (600- 100 a. C), los cuales habitaron principalmente las faldas del cerro Ehecatl. Esta región también fue ocupada por grupos de filiación teotihuacana durante la fase Tlamimilolpa (350-450 d. C), quienes ocuparon diferentes puntos de las faldas de la sierra de Guadalupe tanto en su parte este como al norte (García, Gamboa y Vélez, 2003).

Posterior a la ocupación teotihuacana hubo un hiato en el área y no es hasta la fase Coyotlatelco (650 d. C.) que hubo ocupaciones de otros grupos provenientes del norte de

¹ Las coordenadas UTM (Universal Transverser Mercator) son una proyección geográfica tipo cilíndrica, pues se basa en un modelo ideal que trata a la tierra como un globo inflable que se introduce en un cilindro, el globo empieza a inflarse ocupando el volumen del cilindro e imprimiendo el mapa en su interior, a esta proyección también se le conoce como proyección de Mercator. Esta proyección se hace tangente a un meridiano; las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros únicamente a nivel del mar, que es la base de la proyección del elipsoide de referencia

México, posiblemente de la región del Bajío, los cuales se denominaron como grupos hacedores del complejo cerámico Coyotlatelco estos, a su vez ocuparon las faldas del cerro Ehecatl (García, Gamboa y Vélez, 2003).

Después durante la fase Mazapa (1100 d.C.) hubo una ocupación somera de grupos provenientes del Valle de Tula, el grupo llamado Toltecas, los cuales también ocuparon varios puntos de las faldas de la sierra de Guadalupe.

Hacia el año de 1200, el caudillo chichimeca Xólotl se establece en un cerro que esta a orillas de la laguna de Xalcotan, actualmente se llama pueblo de San Lucas Xóloc; para el año 1202 Tecámac es fundado por los mexicas en su peregrinación, hacia la creación de la gran ciudad México- Tenochtitlán. En el siglo XIV la hegemonía del imperio otomí y los pueblos gobernados desde Xalcotan estuvieron sometidos a un siglo de guerra devastadora, en parte emprendida por los mexicas y en parte de Cuauhtitlan (Gibson, 1967).

La región de Ecatepec fue ocupada durante la fase Azteca III, esta región es ocupada por grupos nahuas de filiación Tepaneca siendo la cabecera² principal Azcapotzalco. En la crónica X, del siglo XVI escrita por Duran, menciona que las primeras sedes de la región tepaneca fueron Tacuba, Azcapotzalco, Tacubaya, Tlalnepantla y Teneyuca, los tepaneca tenían un poder hegemónico en el Valle de México a la fundación de Tenochtitlán en 1347. El poderío de los tepaneca duro aproximadamente hasta 1426 tras morir Tezozomoc, permitiendo así que el nuevo gobernante Maxtla se dejara derrotar por la alianza entre mexica y acolhuas, quitándoles así el poder regional del Valle de México (Gibson, 1967).

Consumada la Independencia de México, los pueblos vieron en la libertad de los Ayuntamientos el medio para garantizar sus derechos políticos y difundir los intereses locales. El 12 de septiembre de 1825 se erigió el municipio de Tecámac por acuerdo de la legislatura, y el 5 de diciembre de ese mismo año se realizó la primera acta de cabida como municipio.

En la región de Texcoco, se encuentran trabajos publicados por Vaillant (1941), Tolstoy (1958) y Noguera (1943, 1975) sobre los sitios salineros que se encontraban a mediados del siglo XX en la ex cuenca lacustre; dichos sitios se caracterizan arqueológicamente por tener una gran cantidad de macetas de la cerámica llamada "impresión textil" lo que llevo a los mencionados investigadores a proponer que estos sitios eran "productores de sal". El mismo Vaillant reporta que los asentamientos salineros se extendían en toda la ribera desde Santa Clara en el sur, hasta Coacalco al noroeste. Es de señalarse que el término que usa Vaillant para designar los montículos salineros es de *Tlatel*, que se identifica por la presencia de altas concentraciones de cerámica e impresión textil (Vaillant 1944). También Sanders (1974) realizó un reconocimiento de superficie en las sub áreas de Cuahuhtitlan, Tacuba y Zumpango, incluyendo a Ecatepec. Según el autor, el sitio que nos ocupa (ibid.) estuvo ocupado desde el Formativo hasta el Posclásico Tardío.

² **Cabecera o cabeza:** institución española de gran importancia, que se volvió fundamental para la organización política y económica colonial, y que exige especial atención por su influencia sobre la historia indígena. En Castilla una cabeza era la capital secular o eclesiástica de un distrito. Una ciudad podía ser la cabeza de un distrito que incluyera una o más villas y una villa podía ser la cabeza de un distrito que abarcara cierto número de pueblos, aldeas o lugares. En la colonia, la variante cabecera se prefirió al término castellano cabeza, y se adoptó el término sujeto con preferencia a los de aldea o lugar.

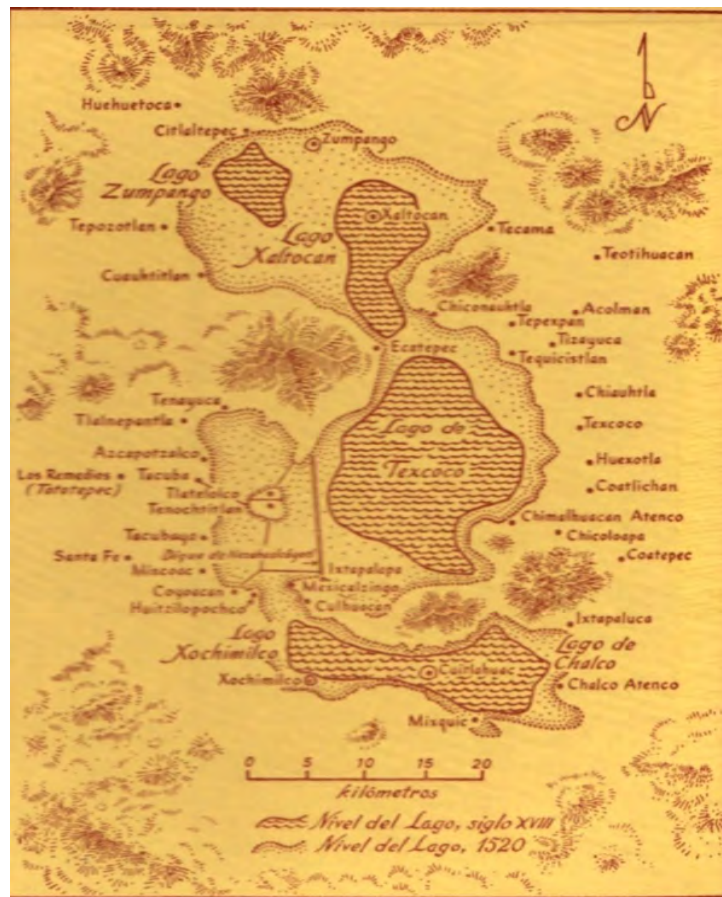


Figura 3.2: Mapa del Valle de México para el año de 1520 (Gibson, 1967).

Contextos arqueológicos muestreados.

Para llevar a cabo la toma de muestras en el sitio arqueológico Héroes de Tecámac, se realizaron seis frentes de excavación (Figura 3.3) (Vélez, 2009).

En el estudio arqueomagnético del sitio, solo se tomaron muestras de los frentes de excavación 1A, 2 y 5, pues en esos frentes se observó evidencia de restos de materiales quemados: hornos, los cuales servía para la cocción de la cerámica y la limpieza de la sal; tlecuiles, los cuales se usaban para la cocción de los alimentos; paredes y pisos. Se obtuvieron 7 muestras de pisos y muros de la unidad habitacional con el fin de obtener un fechamiento arqueomagnético y hacer una comparación con el fechamiento arqueológico. El frente 1A y 2 de excavación consistieron en una excavación extensiva, en donde se logró identificar una unidad habitacional y de trabajo.

En el frente 5 se realizaron algunos pozos de sondeo y calas para detectar elementos arqueológicos, los cuales solo en el pozo uno se detectó un horno similar a los descubiertos en el frente 2. Durante la intervención arqueológica se realizaron retículas independientes en cada uno de los frentes de excavación, sin embargo es de mencionar que el sistema de registro fue homogéneo en todos los frentes de excavación. Para trazar una retícula en cada uno de los frentes de excavación se ubicó un punto eje, el cual se encuentra en la parte más alta del frente, de este punto se trazaron dos ejes, uno norte- sur, y el otro este-oeste, en los cuales se trazaron sectores de 20X20 m., los cuales se registraron de manera bidimensional por medio de coordenadas cardinales acompañadas por un número arábigo consecutivo (Ejemplo: N1).

Los sectores a su vez se encuentran subdivididos por la unidad mínima de excavación que consiste en cuadros de 2X2 m., el registro bidimensional de los cuadros consiste en una combinación de letras y números, los cuadros norte- sur se denominaron con letras mayúsculas, comenzando por la letra A y terminando con la J; el registro de los cuadros en

su dirección este- oeste corresponden a números arábigos consecutivos que va del 1 hasta el 10 (Figura 3.3). Este sistema de registro se utilizó para los frentes de excavación 1, 1B y 2, en donde se realizaron excavaciones extensivas, las cuales fueron orientadas a 60° NW, pues se observó que los muros de los conjuntos arquitectónicos tenían esta orientación. En el frente 5 se realizó una serie de pozos y calas, los cuales fueron orientados hacia el norte.

El registro estratigráfico se hizo por medio de capas naturales y culturales, describiendo sus características físicas (textura, compactación, dureza, color, otros), e interfaces, señalándolos contactos de capa y los procesos de perturbación que han afectado o alterado el contexto. El control de la excavación se realizó retirando en forma secuencial las capas, utilizando pala y pico para las capas superficiales recientes. Al avanzar la excavación se utilizaron instrumentos menores, tales como cucharillas y punzones de hueso.

Se lograron obtener algunas muestras de carbón y muestras de tierras para análisis paleobotánico. (Vélez, 2009).

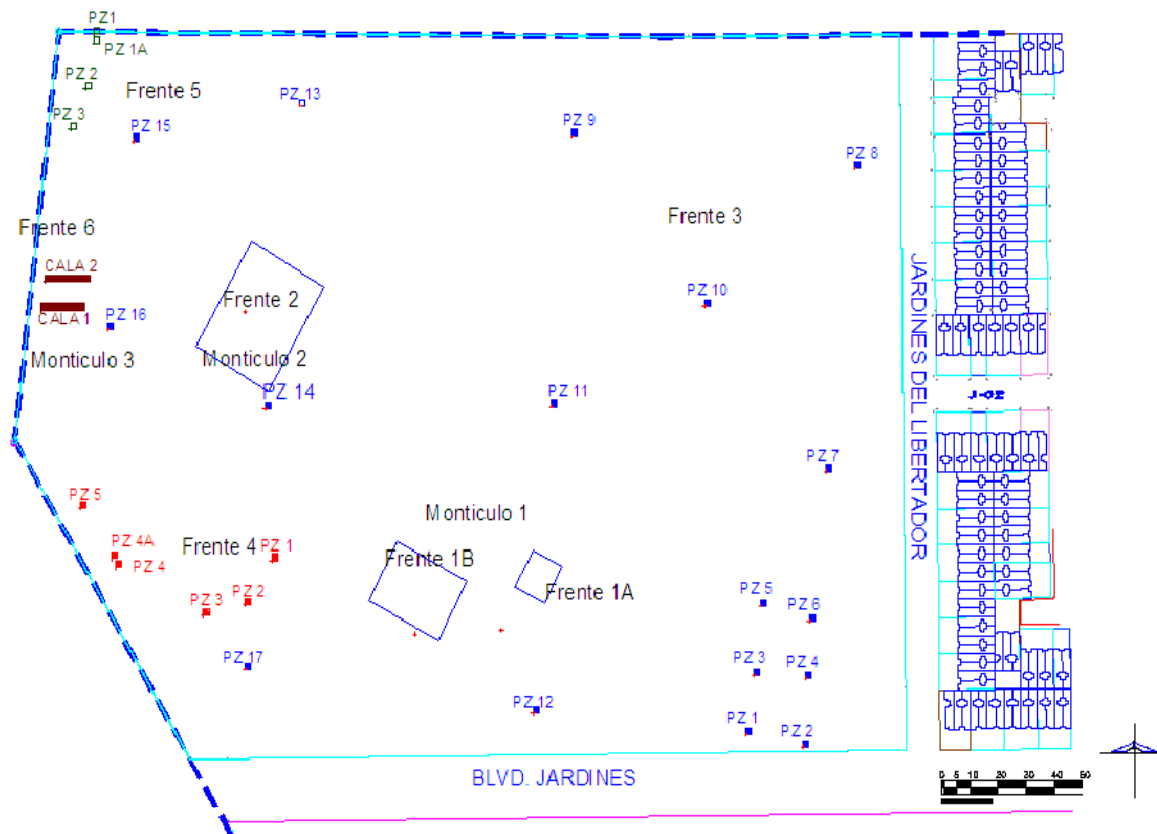


Figura 3.3: Ubicación general de las unidades de excavación (Vélez, 2009)

Frente de excavación 1A (Muestras HT1, HT2)

Para la ubicación de la unidad de excavación extensiva se tomaron las coordenadas UTM en la esquina suroeste de la unidad de excavación con un GPS Garmin. Las coordenadas son: 494732 hacia el este, y 2171359 hacia el norte (Figura 3.4) (Vélez, 2009).

En el montículo registrado con el número 1 se realizó una excavación extensiva. El punto de origen de la retícula de dicho montículo se ubica en las coordenadas UTM siguientes: N 2171597 y E 494700.

Debido a la dimensión del montículo 1, se decidió realizar dos excavaciones extensivas, la primera corresponde al frente de excavación 1A (muestras HT1, HT2), la cual se realizó en

los sectores S1E1 (Figura 3.5) en este frente se encontraron 6 cuartos, un pasillo y un patio; y la segunda excavación corresponde al frente de excavación 1B (Vélez, 2009).

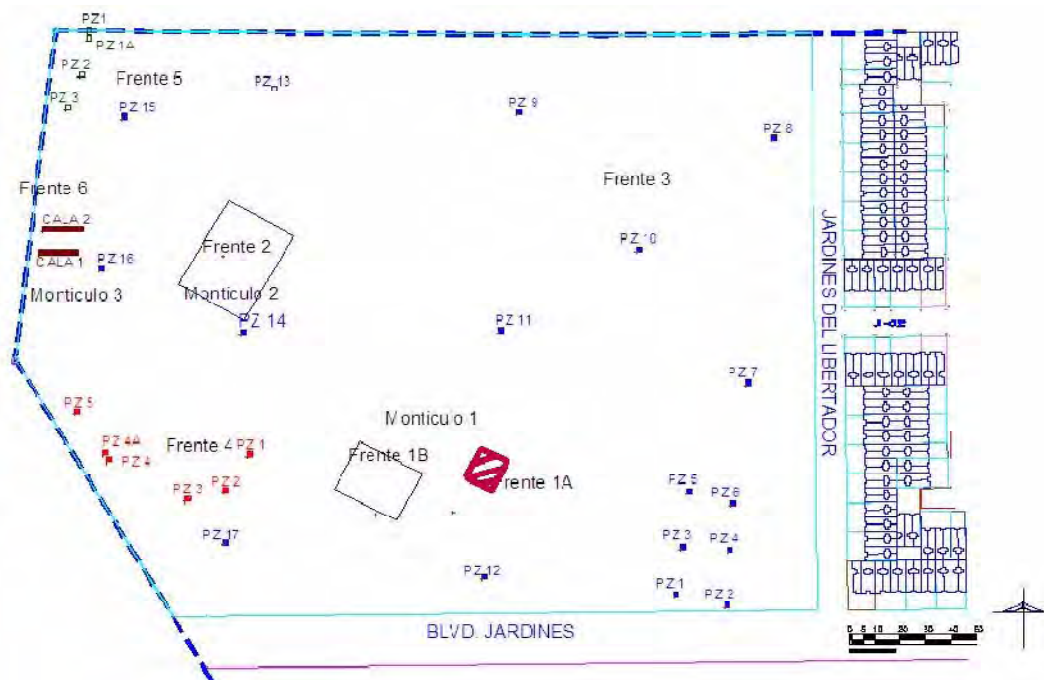


Figura 3.4: Plano de ubicación del Frente de Excavación 1A (Muestra HT1, HT2) (Vélez, 2009)



Figura 3.5: Perspectiva norte de la unidad de excavación extensiva 1A (Vélez, 2009).

En este frente de excavación se descubrió una unidad habitacional la cual está compuesta por un pequeño patio, el cual está rodeado por cuatro cuartos, los cuales uno fungía como posible área para preparar alimentos por la presencia del Tlecuil y los otros posiblemente como dormitorios.

Para el frente de excavación 1A se encontró la siguiente estratigrafía:

- Capa I: Va de 0 a 0.18 m., es de textura limosa con salitre revuelta, basura moderna y pasto; es de color café muy claro, casi gris, de compactación media.

- Capa II: Va de 0.18 a 0.30 m., es de textura limo- arcilloso de color café claro, es poco compacta y poco plástica, esta capa varia en su grosor, dependiendo del terreno hay partes donde llega a alcanzar más de 0.30 m.
- Capa III: Va de 0.30 a 0.90 m., es arcilla, color café oscura, su textura es plástica y está revuelta con piedras de tezontle y fragmentos de adobe que pertenecieron al área arquitectónica. En esta capa, en el cuarto número 2, se encontró un tecuil, el cual consta de 4 piedras grandes de basalto que presentan evidencias de exposición al fuego.
- Capa III a Piso 1: Es un piso de estuco que se encuentra en muy mal estado de conservación y sólo se identificó en algunas partes del área arquitectónica. Bajo este piso hay un apisonado que es de textura limo- arcillosa.
- Capa IV: Va de 0.90 a 1.94 m., es de textura arcillosa muy plástica con una compactación media de color café oscuro revuelta con materia orgánica.

A continuación, se muestran de donde se recolectaron las muestras HT1 y HT2, para estas muestras (Figura 3.6), se realizó una excavación extensiva.

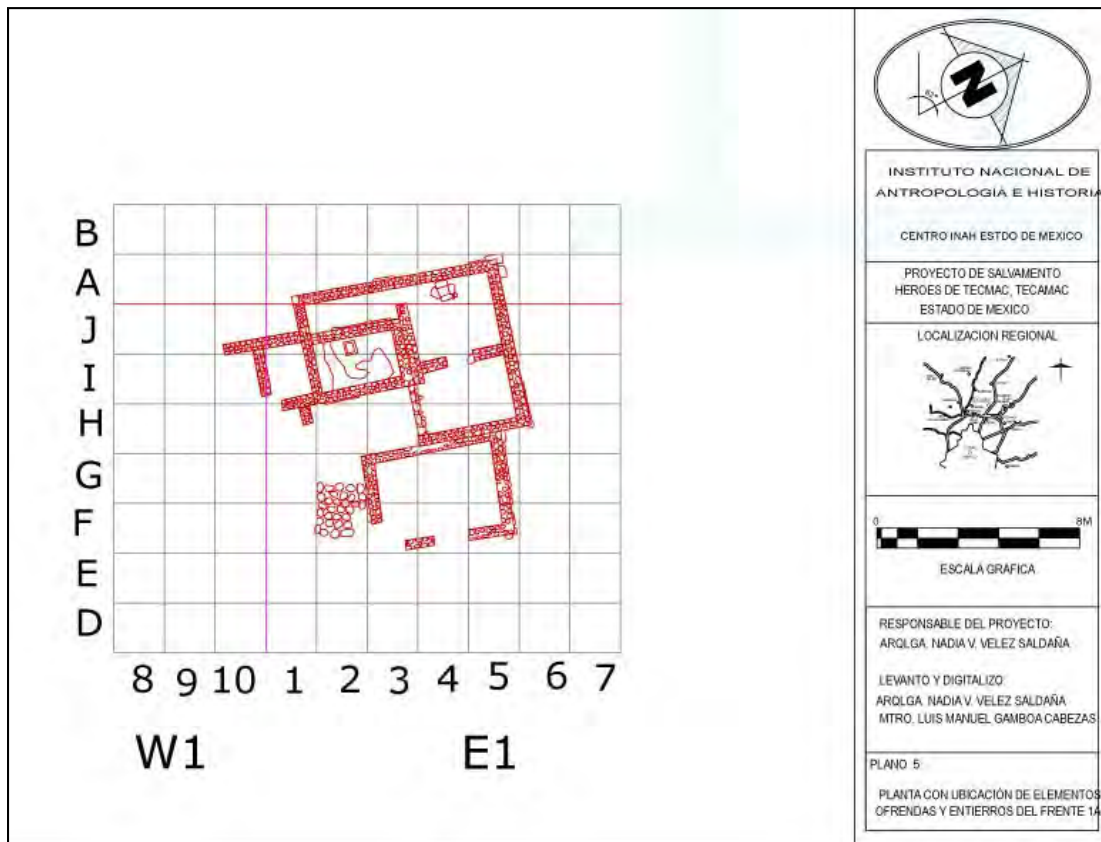


Figura 3.6: Planta con ubicación de elementos, ofrenda y entierros del frente 1A. (Muestras HT1, HT2)
Plano proporcionado por la Arqueóloga Nadia Vélez Saldaña

Muestra HT1:

Frente I- A
Sector SI- EI
Cuadro A4
Elemento 10 (Probable *Tlecuil*, Figura 3.7)

Muestra HT2:

Frente I- A
Sector SII- EI
Cuadro J2
Elemento 5 (Probable *Tlecuil*, Figura 3.9)



Figura 3.7: Posible Tlecuil encontrado en el cuarto 2 del frente de excavación 1A (Muestra HT1) (Vélez, 2008).

El elemento 10 el cual es un posible Tlecuil, corresponde a la capa III, mencionada anteriormente en la estratigrafía del frente 1A, y consta de 4 piedras grandes de basalto que presentan evidencia de exposición al fuego, y se encontró que tiene una cronología general la fase de Azteca IV (Vélez, 2008).

La fase de Azteca IV data del periodo de 1500 D.C. a 1600 (García, 2005). A continuación se muestra la recolección de la muestra HT1 (Figura 3.8).



Figura 3.8: Toma de la muestra HT1, elemento 10 del frente 1A. Foto proporcionada por el Arqueólogo Vicente Martínez Miranda.



Figura 3.9: Tlecuil encontrado en el cuarto 4 del frente de excavación 1A (Muestra HT2) (Vélez Saldaña, 2009).

El elemento 5 el cual es un posible Tlecuil, corresponde a la capa III, mencionada anteriormente en la estratigrafía del frente 1A, y es de una sola pieza (monolítica) de basalto, tiene forma rectangular y se encontraba empotrado sobre el piso ubicado al centro del cuarto 4; se encontró que tiene una cronología general la fase de Azteca IV (Vélez Saldaña, 2009).

A continuación se muestra la recolección de la muestra HT2 (Figura 3.10).



Figura 3.10: Toma de la muestra HT2, elemento 5 del frente 1A. Foto proporcionada por el Arqueólogo Vicente Martínez Miranda.

Frente de excavación 2 (Muestras HT5, HT6 y HT7).

Éste frente se encuentra entre los frentes de excavación 1 y 5, el frente de excavación 2 está al centro del predio que fue intervenido. Las coordenadas UTM en las que se ubica el punto de origen de la retícula general son: E494646 y N2171461.

El frente de excavación 2 corresponde a un área en la que se detectaron un par de cuartos con cimientos de tezontle, un cuarto de adobe y una serie de hornos a cielo abierto, relacionados principalmente con la producción de cerámica salinera. (Figura 3.11) (Vélez, 2009).

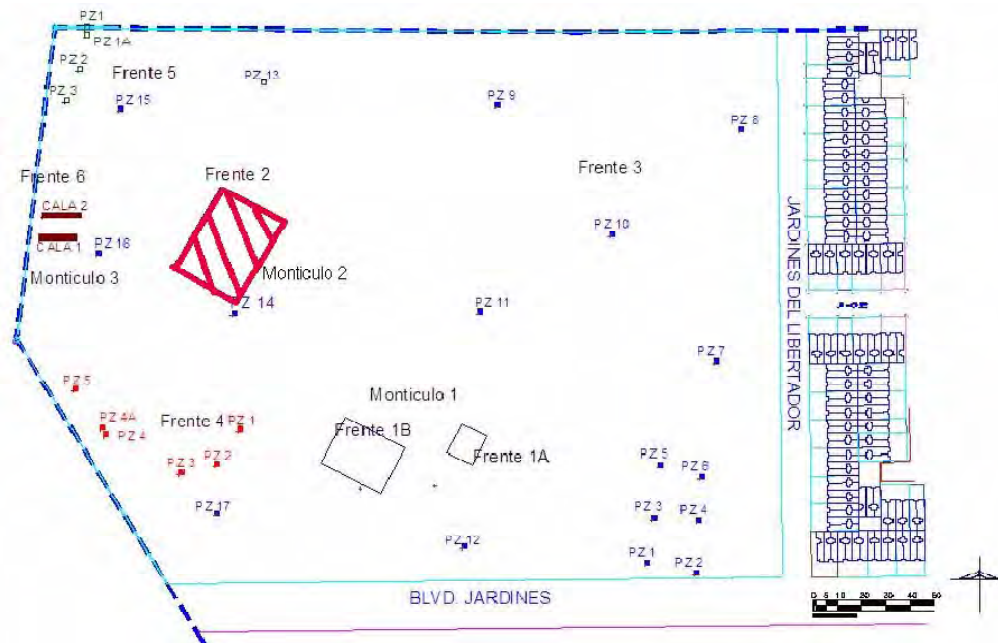


Figura 3.11: Plano de ubicación general del frente de excavación 2 (Muestra HT5, HT6, HT7) (Vélez, 2009).

En este frente de excavación se trazaron 4 sectores de 20X20 m., teniendo como resultado una cuadrícula con un área de 1600 m². Los sectores se denominaron en relación a los puntos cardinales, los sectores fueron los siguientes: Sector N1- W1, Sector N1- E1, Sector S1- W1, Sector S1- E1 (Vélez Saldaña, 2008).

La estratigrafía del lugar es casi homogénea. La arquitectura se detectó a los 1.90 m. de profundidad, por debajo de ésta se encontró un nivel de ocupación de muros y adobes, y por debajo de éstos se hallaron hornos y un área de desecho cerámico. Se detectaron 7 capas en la excavación extensiva de este frente. Estas capas presentan las siguientes características:

- Capa I: Va aproximadamente de 0 a 0.10 m., esta capa superficial corresponde a tierra de textura arcillosa- limosa de color café oscuro y compactación baja.
- Capa II: Va aproximadamente de 0.10 a 1.20 m., está formada por tierra arenosa-arcillosa de color café claro, tiene presencia de gravilla, es húmeda y de compactación alta.
- Capa III: Va aproximadamente de 1.20 a 1.25 m., corresponde a tierra de textura arcillosa de color café claro, es poco húmeda, está moteada con tierra color negra y es de compactación alta.

- Capa IV: Va aproximadamente de 1.25 a 1.40 m., corresponde a tierra de textura arcillosa- limosa de color café claro, es tierra seca y esta capa es de compactación baja.
- Capa V: Va aproximadamente de 1.40 a 1.60 m., está formada por tierra de textura limosa de color café oscuro y húmeda, es de compactación alta.
- Capa VI: Va aproximadamente de 1.60 a 1.75 m., corresponde a tierra húmeda, de textura arcillosa- limosa de color café claro, se presenta material arqueológico y es de compactación alta.
- Capa VII: Va aproximadamente de 1.75 a 4.00 m., corresponde a tierra de textura arcillosa color negra, esta capa presenta material arqueológico y es de compactación alta.

El sistema constructivo de esta área corresponde a una plataforma de arcilla (Figura 3.12), sobre la cual se construyeron los elementos arquitectónicos, éstos fueron detectados a diferentes profundidades identificando tres niveles de ocupación, los cuales se describirán brevemente (Vélez Saldaña, 2009).

- Primer nivel ocupacional: Se encontró una profundidad de 1.68 a 1.95 m. de profundidad y comprende un par de cuartos. Ésta construcción presenta un cimiento compuesto por piedras de tezontle rojo, sobre el cual desplantaron los adobes que conforman las paredes. Por los elementos arqueológicos, restos de cerámica y restos óseos fáusticos, se propone que la temporalidad de este nivel corresponde a la fase Azteca IV, con una probable continuidad durante el inicio de la época colonial.
- Segundo nivel ocupacional: Este nivel fue de 2.00 a .90 m. de profundidad, comprendió un cuarto de adobe, 5 hornos a cielo abierto en los cuales se realizaba la cocción de cerámica salinera y probablemente la aceleración de la evaporación de la salmuera dentro del interior de una olla, y se encontró también una olla de 0.78 m. de ancho por 0.73 m. de alto, la cual podría tratarse de un tinacal. Por los elementos arqueológicos, entierros, restos de cerámica y fáusticos se puede proponer que la temporalidad de este nivel de ocupación corresponde a la fase de Azteca III.
- Tercer nivel ocupacional: Tiene una profundidad de 3.00 a 4.00 m. y comprendió un horno a cielo abierto en los cuales se realizaba la cocción de la cerámica salinera, y probablemente también se realizaba la aceleración de ollas de la evaporación de la salmuera dentro del interior de ollas y por otro lado, una concentración de restos cerámicos, resultado de la producción de cerámica salinera que abarcó 6 cuadros.



Figura 3.12: Perspectiva de la plataforma de arcilla, registrada como montículo 2 (Muestras HT5, HT6, HT7) (Vélez, 2009).

A continuación, se muestran de donde se recolectaron las muestras HT5, HT6, HT7, para estas muestras (Figura 3.13).

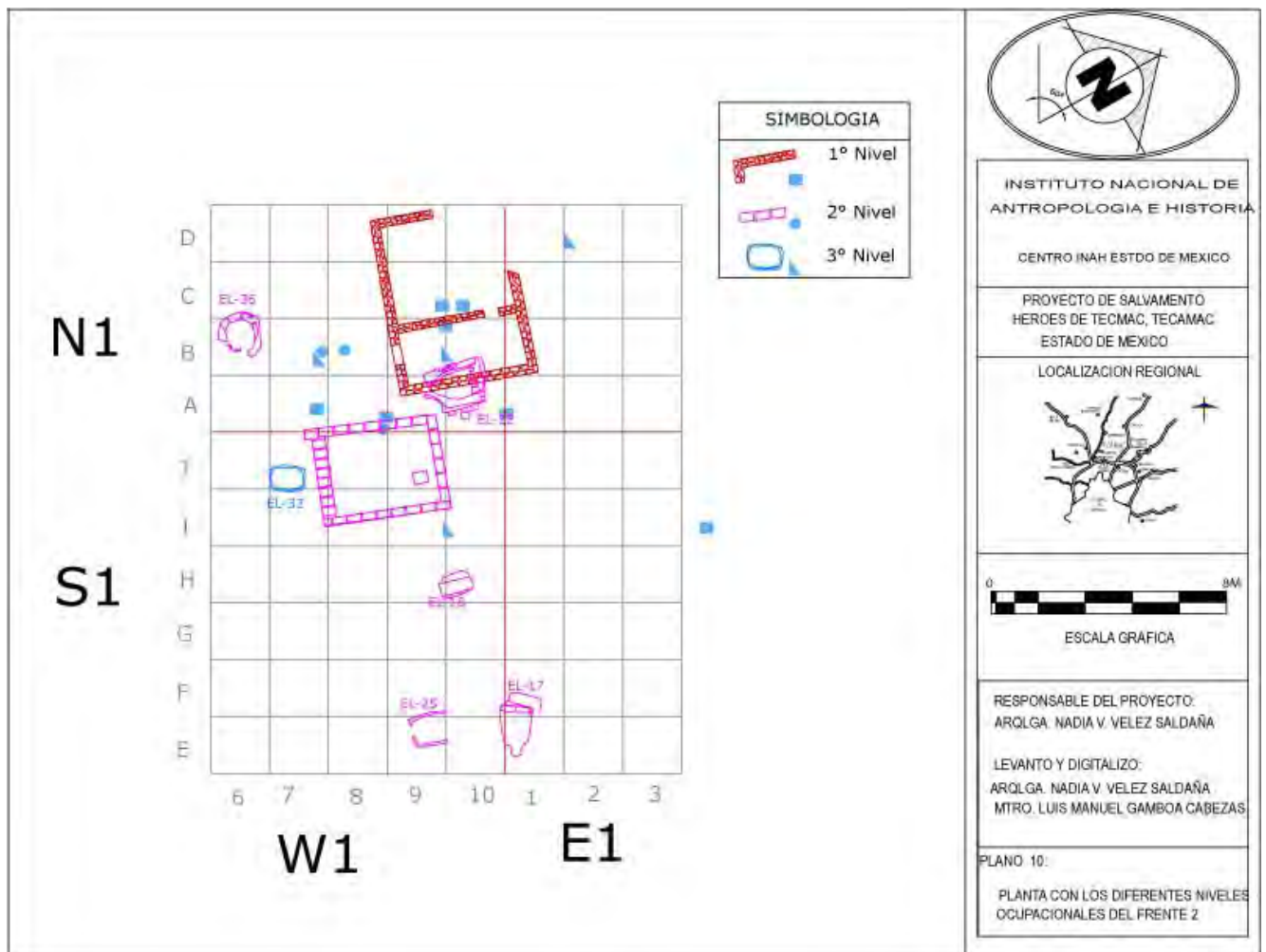


Figura 3.13: Planta con los diferentes niveles de ocupación del frente 2 (Muestras HT5, HT6, HT7). Plano proporcionado por la Arqueóloga Nadia Vélez Saldaña.

Muestra HT5:

Frente 2

Sector SI- EI

Cuadro E1, F1

Elemento 17(Horno a cielo abierto, Figura 3.14)

Muestra HT6:

Frente 2

Sector SI- WI

Cuadro H10, H9, G9

Elemento 18(Horno a cielo abierto, Figura 3.16)

Muestra HT7:

Frente 2

Sector S2- E1

Cuadro I1



Figura 3.14: Horno a cielo abierto, elemento 17 (Muestra HT5) (Vélez, 2009).

El elemento 17 se encontró en el segundo nivel ocupacional, y corresponde a un horno para la producción de cerámica. Es un horno de planta rectangular con una entrada de aire en costado S.E. formado de adobes con diferentes grados de cocción. La profundidad al interior es de 0.40 m. La cronología general para este horno es de la fase Azteca III (Vélez, 2009).

La fase de Azteca III va de 1300 a 1500 d.C. (García, 2005).

A continuación se muestra la toma de la muestra HT5 (Figura 3.15).



Figura 3.15: Toma de la muestra HT5, elemento 17 del frente 2. Foto proporcionada por el Arqueólogo Vicente Martínez Miranda.



Figura 3.16: Horno abierto, elemento 18. (Muestra HT6) (Vélez, 2009).

El elemento 18, se encontró en nivel de ocupación 2, es un horno para cerámica salinera de planta rectangular, formado por adobes con diferentes grados de cocción. Presenta una profundidad de 0.20m. y presenta una cronología general de la fase Azteca III (Vélez, 2009).

A continuación se presenta la toma de la muestra HT6 (Figura 3.17).



Figura 3.17: Toma de la muestra HT6, elemento 18 del frente 2. Foto proporcionada por el Arqueólogo Vicente Martínez Miranda.

La muestra HT7 corresponde a piso de ocupación de los hornos, y tiene una cronología general de Azteca III. A continuación se muestra la extracción la muestra HT7 (Figura 3.18).



Figura 3.18: Toma de la muestra HT7, ubicada en el frente 2. Foto proporcionada por el Arqueólogo Vicente Martínez Miranda.

Frente de excavación 5 (Muestras HT3 y HT4).

Este frente se localiza en el extremo de la esquina noroeste del predio, al norte del montículo 3. En este caso se realizaron algunos pozos, los cuales tienen una dimensión de 2X2 m. y se trazaron cada 14m., comenzando por el pozo 1 que se encuentra en el límite norte del predio; los pozos se trazaron en una pequeña elevación de arena de procedencia dudosa, esto se hizo con el objetivo de verificar la presencia o ausencia de vestigios arqueológicos (Figura 3.19, 3.20). Los pozos se ubicaron con un GPS Garmin, tomando como punto de referencia la esquina suroeste (SW) de los pozos (Vélez, 2009).



Figura 3.19: Ubicación de los pozos en el frente de excavación 5 (Muestras HT3, HT4) (Vélez, 2009)

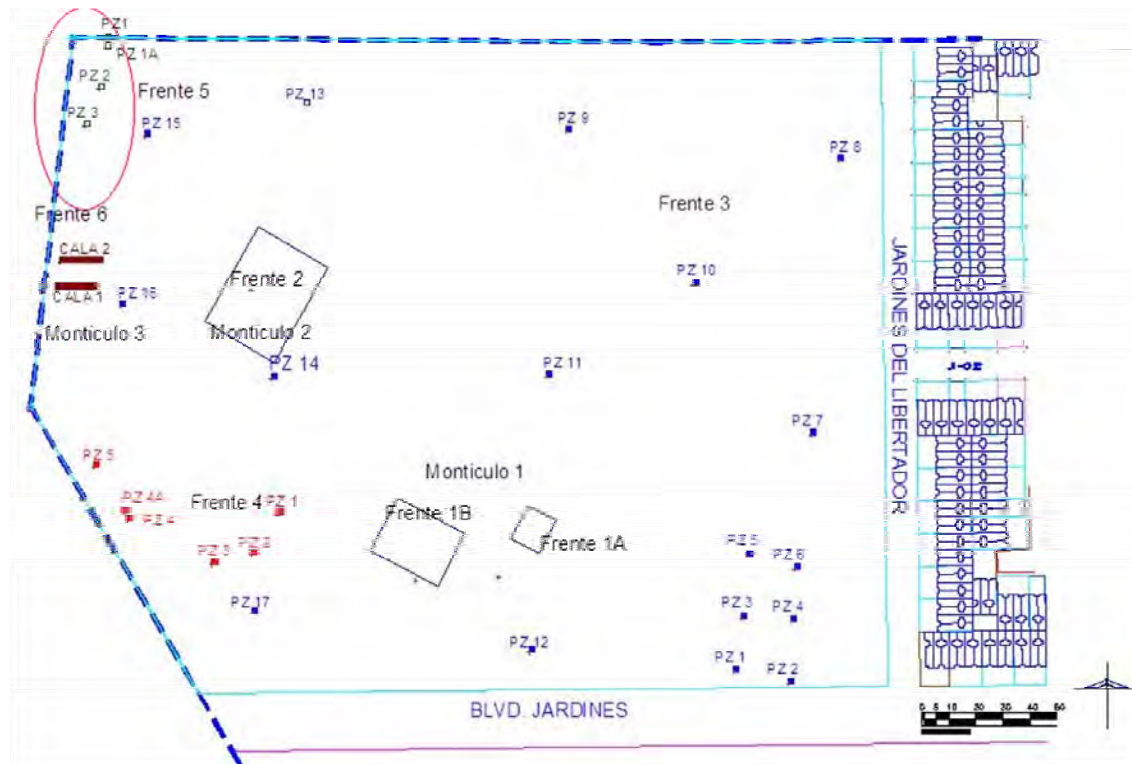


Figura 3.20: Plano de la ubicación de los pozos en el frente de excavación 5 (Muestras HT3, HT4) (Vélez, 2009).

Para la toma de las muestras HT3 y HT4 solo se ocupó el pozo 1, la muestra HT3 se tomó de la parte más arriba del pozo.

A continuación se describirá brevemente la estratigrafía y ubicación del pozo 1:

Se ubica en el extremo de la esquina noroeste del predio, al norte del montículo 3, las coordenadas UTM de la esquina suroeste (SW) del pozo son: N2171753 y E494557. Este pozo presenta la siguiente estratigrafía (Figura 3.21):

- Capa I: Va de 0 a 0.80 m., su textura es arenosa de color gris claro, presenta una compactación blanda.
- Capa II: Va de 0.80 a 0.95 m., su textura es arenosa- limosa de color café claro, presenta una compactación dura.
- Capa III: Va de 0.95 a 1.40 m., su textura es limosa de color gris claro, presenta una compactación blanda.

Es de mencionar que en la capa I se detectó basura moderna revuelta con arena, la cual pudo haber sido parte de algún montículo desmantelado cuando se realizó un camino de terracería a un costado del montículo 3, debido a que estos montones de arena presentan muchos materiales arqueológicos en la superficie. Sin embargo, la capa III no presentaba alteración alguna, esto se observó por la homogeneidad en la textura y color de la capa, también se observó la presencia de un pequeño hogar, en el cual había una concentración de materiales arqueológicos y carbón, es de mencionar que los materiales asociados a dicho hogar corresponde a la fase Azteca III (Vélez, 2009).



Figura 3.21: Perspectiva del pozo 1, frente de excavación 5 (Muestras HT3, HT4) (Vélez, 2009)

En este frente de excavación se encontró una gran variedad de materiales correspondientes a la fase Azteca III y Azteca IV, se cree que fue usado como basurero por los habitantes.

A continuación se muestra la recolección de las muestras HT3 y HT4 (Figura 3.22, 3.23).



Figura 3.22: Toma de la muestra HT3, ubicada en el frente 5, pozo 1. Foto proporcionada por el Arqueólogo Vicente Martínez Miranda.

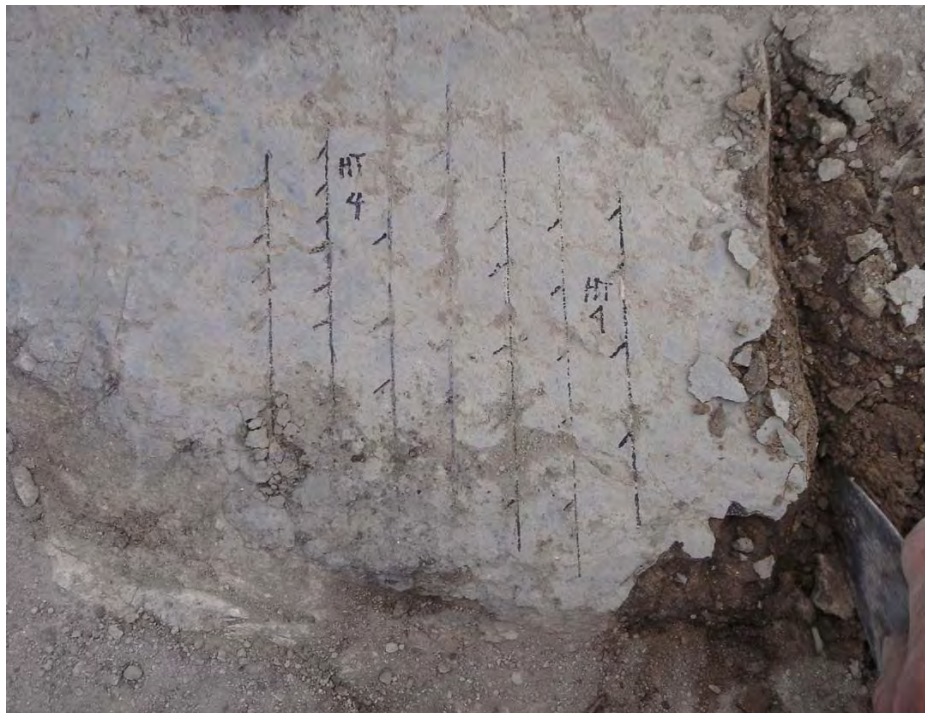


Figura 3.23: Toma de la muestra HT4, ubicada en el frente 5, pozo 1. Foto proporcionada por el Arqueólogo Vicente Martínez Miranda

Capítulo 4: Toma y procesamiento de muestras arqueomagnéticas.

Para realizar un estudio arqueomagnético de cierto sitio, se toman muestras, las cuales constan con un aproximado de 10 a 12 especímenes cada muestra, esto se hace para garantizar una media estadística más precisa del lugar.

Las muestras arqueomagnéticas se toman en el sitio arqueológico a estudiar, el material necesario para la toma de muestras es el siguiente:

- 1.- Brújula Brunton
- 2.- Escuadras
- 3.- Cincel de acero inoxidable
- 4.- Martillo
- 5.- Espátulas
- 6.- Libreta
- 7.- GPS
- 8.- Plumones permanentes
- 9.- Bolsas de plástico
- 10.- Cajas de cartón
- 11.- Algodón
- 12.- Cúter
- 13.- Brocha
- 14.- Pegamento Epóxico de secado rápido (RESIEPOXI)
- 15.- Cilindros de madera de 0.5 cm. de alto y 2.54 cm. de diámetro (Éstos deben de ir bien lijados)

La brújula Brunton presenta los siguientes elementos:



Figura 4.1: Esquema de la brújula Brunton (Soler, 2006).

Los pasos a seguir para la obtención de las muestras arqueológicas son los siguientes:

- 1.- Limpiar la superficie a estudiar con la brocha, ésta puede ser piso, muro o pintura.
- 2.- Se realiza una mezcla de pegamento RESIEPOXI y se coloca en los cilindros de madera, posteriormente, estos cilindros se colocan en la superficie a extraer, y se espera de 5 a 10 minutos a que se seque el pegamento.

3.- Con la brújula se orienta al cilindro de madera que esta sobre la superficie a examinar hacia el norte geográfico; posteriormente se mide la declinación y la inclinación. Esto se hace de acuerdo a si la muestra es un piso o un muro. A continuación se dará una explicación de cómo hacer estas mediciones:

- Piso:
 - a) Se coloca la brújula sobre el piso, buscando centrar la posición del ojo de buey.
 - b) Con ayuda del canto derecho la brújula, y con el plumón permanente se traza una recta, ésta se hace hacia donde apunta la pínula. La punta de la flecha debe coincidir con la dirección a la que apunta la pínula.
 - c) Se anota en la libreta la dirección que corresponde al AZIMUT (declinación) de la línea que apunta al norte en el cilindro, esta dirección es la que muestra la aguja de la brújula sobre la escala de ésta.
 - d) Se coloca el canto de la brújula sobre la línea que se trazó, la punta de la flecha y la pínula deben coincidir.
 - e) Se mueve el control de nivel que se encuentra detrás de la brújula, logrando que la burbuja del ojo de buey del clinómetro esté centrada.
 - f) Se anota en la libreta el valor de la inclinación, la cual es la escala del clinómetro que apunta la aguja de la brújula.
 - g) Con ayuda del cincel y del martillo se golpea alrededor del área de la muestra hasta separar ésta del piso.
 - h) Envolver los especímenes extraídos en algodón y guardarlos en una bolsa de plástico.
- Muro
 - a) Se coloca el canto derecho de la brújula sobre el muro, buscando centrar la posición del ojo de buey.
 - b) Con ayuda del canto derecho la brújula, y con el plumón permanente se traza una recta, ésta se hace hacia donde apunta la pínula. La punta de la flecha debe coincidir con la dirección a la que apunta la pínula.
 - c) Se anota en la libreta la dirección que corresponde al AZIMUT (declinación) de la línea que apunta al norte en el cilindro, esta dirección es la que muestra la aguja de la brújula sobre la escala de ésta.
 - d) Se coloca el canto derecho de la brújula sobre la superficie del cilindro perpendicularmente a la línea que apunta al norte geográfico.
 - e) Se mueve el control de nivel que se encuentra detrás de la brújula, hasta lograr que el ojo de buey quede centrado.
 - f) Se anota en la libreta el valor de la inclinación, la cual lo indica la aguja del clinómetro sobre su escala.
 - g) Con ayuda del cincel y martillo se golpea alrededor del área de la muestra hasta separar ésta del muro.
 - h) Envolver los especímenes extraídos en algodón y guardarlos en una bolsa de plástico.

4.- Posteriormente, las muestras son llevadas al Laboratorio de Paleomagnetismo para cortarlas, esto se hace con el fin de que los especímenes cuenten con las medidas apropiadas para ser procesadas en un magnetómetro de giro JR6, éste mide la oscilación del campo magnético producido por la rotación del momento magnético de las muestras y

tiene una resolución de 10^{-10} Am². Las medidas que cada espécimen debe de tener son 2 cm. de diámetro y 2.54 cm. de alto.

5.- Se mide primero la magnetización remanente natural (NRM) de cada espécimen.

6.- Con los datos de la magnetización remanente natural se escogen los especímenes pilotos, los cuales son lavados magnéticamente por campos alternos, esto se hace para eliminar magnetizaciones secundarias y que se supone son de menor coercitividad.

Los pasos para pilotos son: 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000 Oe

Los pasos cortos son: 0, 50, 100, 200, 400, 600, 800 y 1000 Oe.

7.- Se obtienen el diagrama de Zijderveld de cada espécimen lavado magnéticamente mediante el programa de computadora PCA1A.BAS. En este diagrama se grafica la componente horizontal y vertical contra la componente Este, componentes obtenidas con el magnetómetro de giro JR6. Las direcciones características de cada muestra son obtenidas y analizadas en el programa anteriormente mencionado.

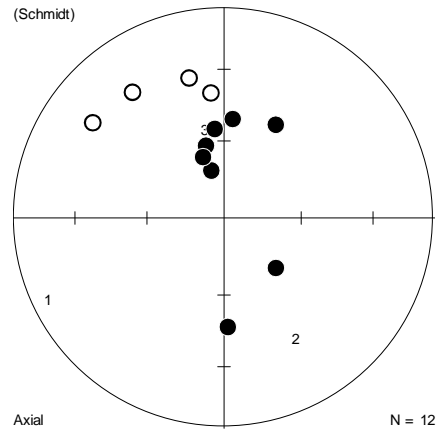
8.- Con el programa computacional FISH1.BAS se obtiene la estadística de Fisher para cada muestra, con este programa se obtiene la declinación e inclinación promedio de la muestra, así como la incertidumbre que se puede tener en nuestros datos.

9.- Con el programa SSWIN se trazan las direcciones sobre una red de igual área tanto por espécimen, y posteriormente de cada muestra. Con este programa se puede obtener la dirección promedio de cada muestra, sus parámetros estadísticos de la distribución Fisher y su imagen gráfica con el círculo de confianza α_{95} .

Capítulo 5: Resultados y Análisis de Datos.

Muestra HT1

Se midieron 12 especímenes en la muestra HT1, primeramente se obtuvieron las mediciones NRM de cada espécimen y se graficó una red estereográfica (Gráfica 5.1).



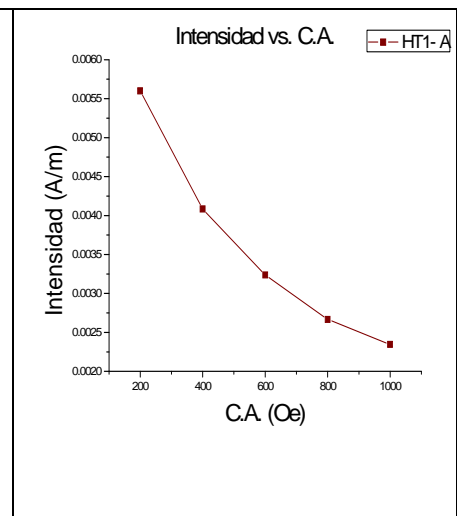
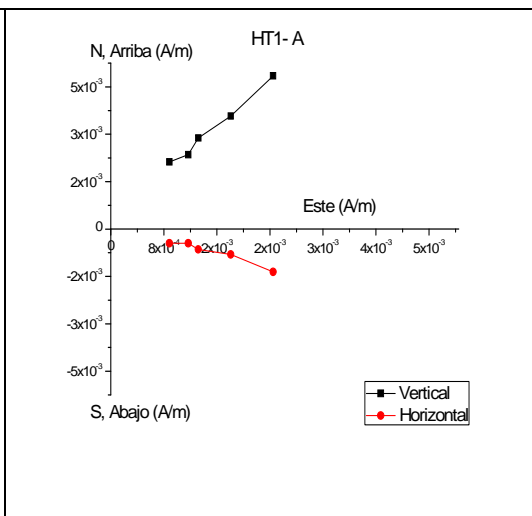
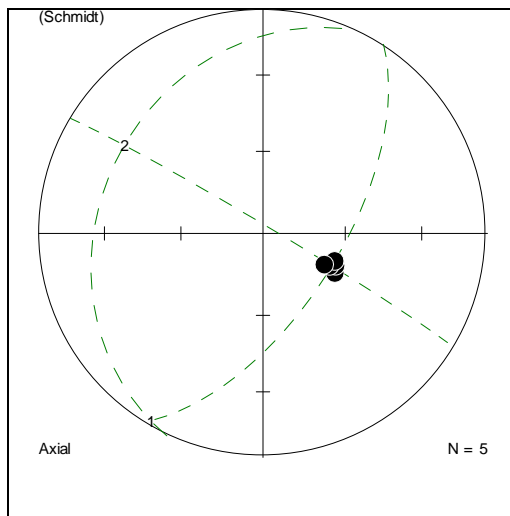
Gráfica 5.1: Red estereográfica de la medición NRM para la muestra HT1.

A continuación se muestra en la tabla 5.1 la declinación e inclinación de todos los especímenes de la muestra.

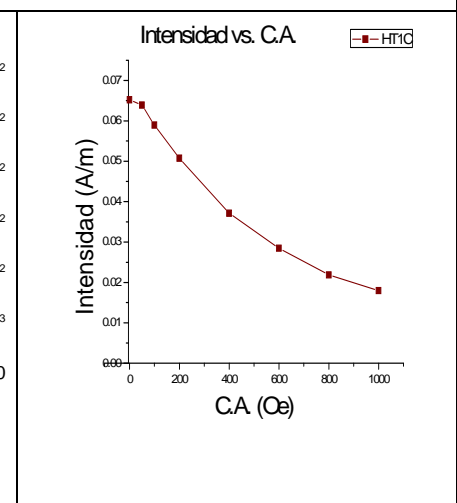
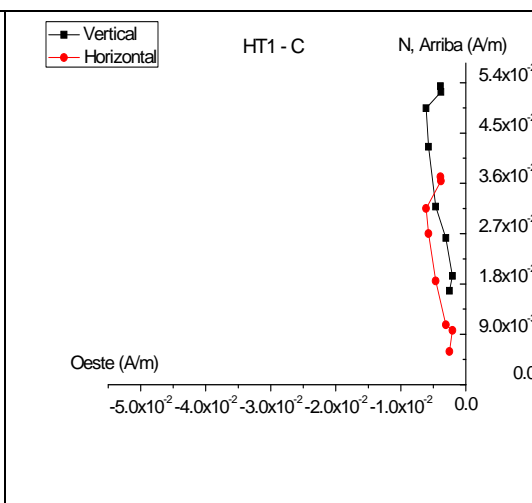
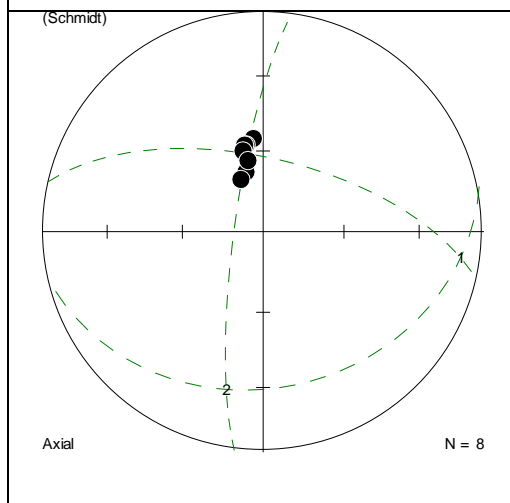
Muestra HT1-	Declinación	Inclinación	NRM	Desmagnetizada
A	116.5	61.3		X
B El error en este espécimen fue muy grande	178	47	X	
C	350.7	57.3		X
D	4.2	55.0		X
E	340.8	62.6		X
F	324.4	70.7		X
G	324	-27	X	
H	346	-32	X	
I	305.1	-24.5		X
J	354	-40	X	
K	30.8	47.5		X
L	341	65	X	

Tabla 5.1: Mediciones de declinación e inclinación para cada espécimen de la muestra HT1.

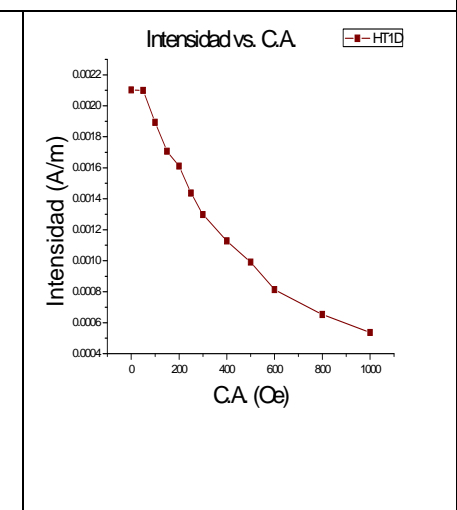
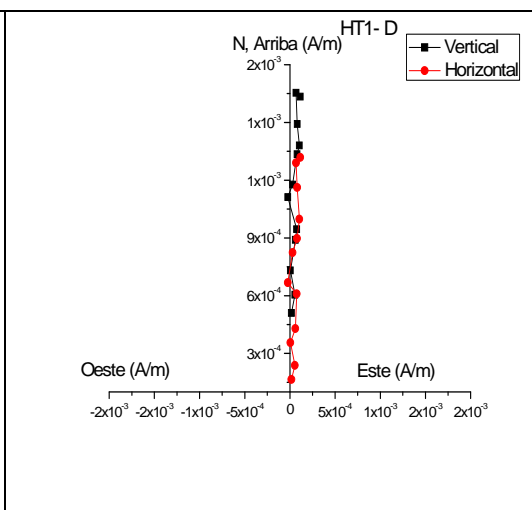
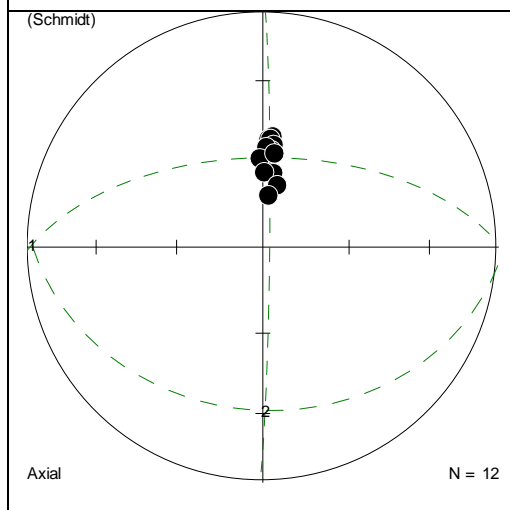
Posteriormente se seleccionaron 2 especímenes de la muestra, los cuales presentaron una intensidad muy alta y se denominan pilotos (HT1- D, E) y se seleccionaron otros 5 especímenes para desmagnetizarlos en pasos cortos, éstos fueron los siguientes: HT1- A, C, F, I, K. Por cada espécimen se realizó una curva de desmagnetización, esto es, se graficó la Intensidad del C.A. aplicado vs. C.A., los diagramas de Zijdeveld y las redes estereográficas. A continuación se muestran las gráficas mencionadas.



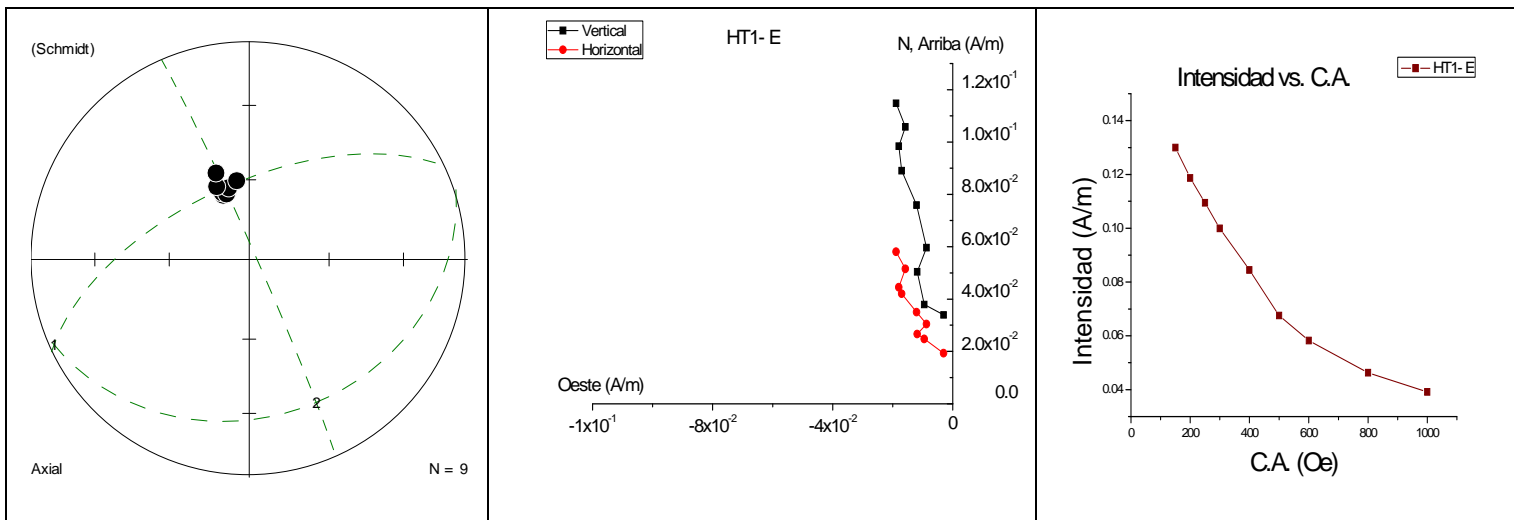
HT1-A: $\overline{Dec} = 116.5$; $\overline{Inc} = 61.3$



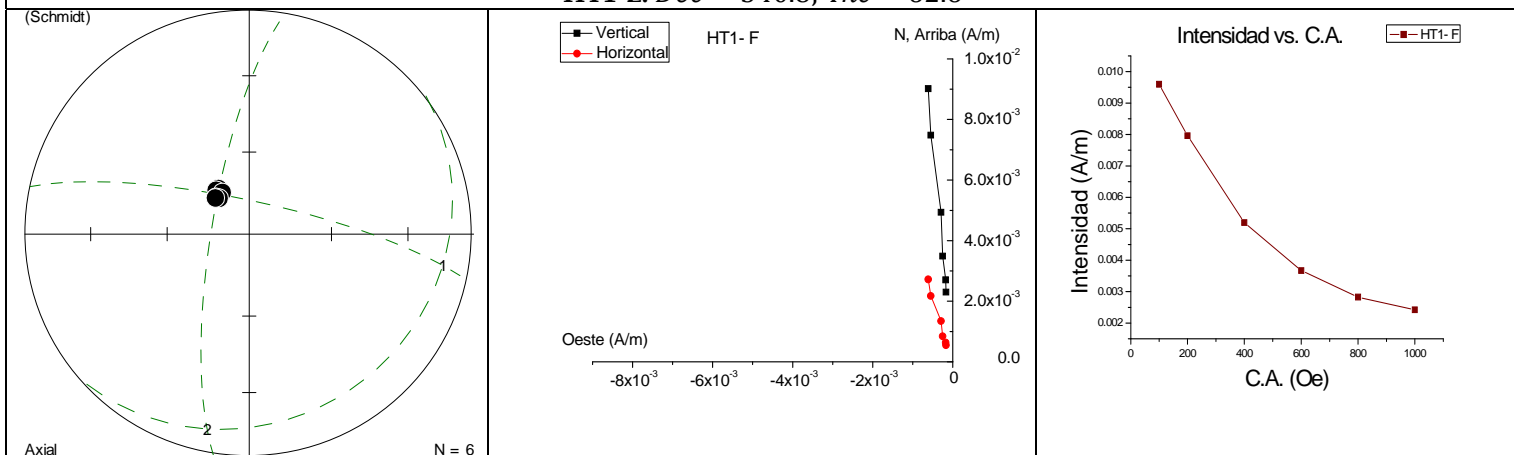
HT1-C: $\overline{Dec} = 350.7$; $\overline{Inc} = 57.3$



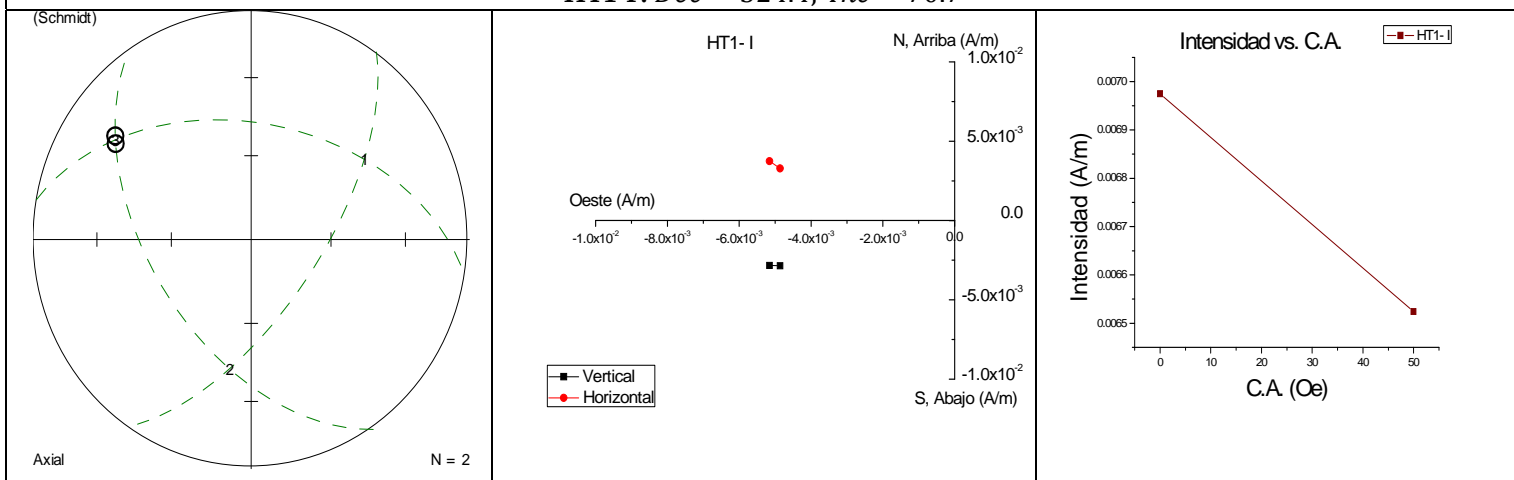
HT1-D: $\overline{Dec} = 4.2$; $\overline{Inc} = 55$



HT1-E: $\overline{Dec} = 340.8$; $\overline{Inc} = 62.6$



HT1-F: $\overline{Dec} = 324.4$; $\overline{Inc} = 70.7$



HT1-I: $\overline{Dec} = 225$; $\overline{Inc} = -35.2$

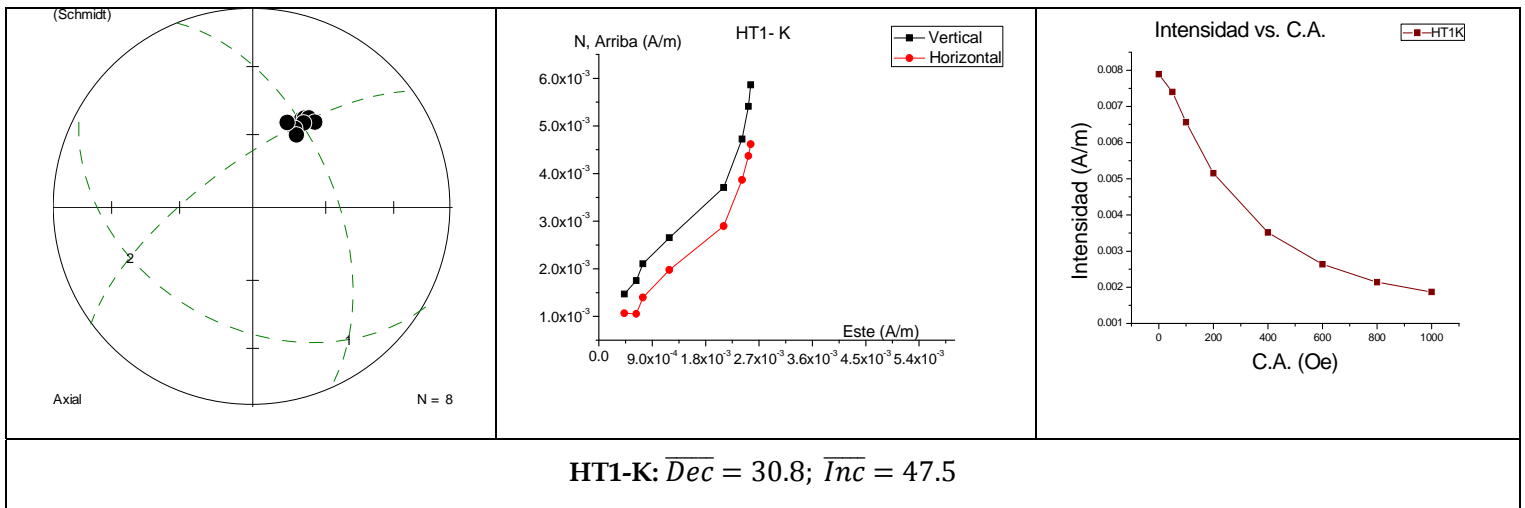


Tabla 5.2: Proyecciones estereográficas, diagramas de Zijderveld y gráfica de Intensidad vs. C.A. para los especímenes seleccionados en la muestra HT1.

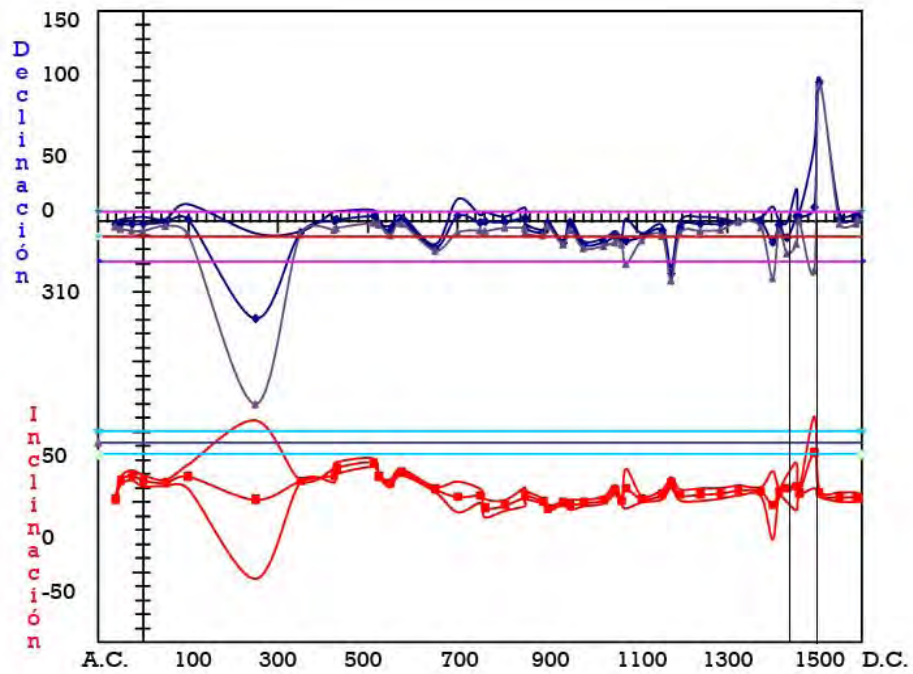
En la tabla 5.2 observamos que los especímenes HT1- A, I, K presentan mucha dispersión sin una dirección clara.

También se observa en la tabla 5.2 que los diagramas de Zijderveld en los especímenes HT1- C, D, E, F presentan una orientación tendiente al origen, con una inclinación anómalamente alta, pero en la tabla 5.3 y Gráfico 5.2 parece ser un evento que ocurrió durante la etapa de ocupación de Tecámac. El espécimen HT1-I fue eliminado del análisis por su polaridad reversa y que es probablemente atribuida a mal registro del campo ya que al desmagnetizarse no fue posible seguir el proceso debido a que no podía disminuirse el porcentaje de error; por la misma razón fueron excluidos los especímenes G, H y J.

Por tales razones, se seleccionaron los especímenes HT1- C, D, E, F para analizarlos en el programa FISH1.BAS y obtener la declinación y la inclinación de la muestra y su comportamiento en la red estereográfica, la cual se muestra a continuación.

HT1		Muestra	Declinación	Inclinación	MAD
		HT1- C	350.7	57.3	3.8
		HT1- D	4.2	55	4.4
		HT1- E	340.8	62.6	2.1
		HT1- F	324.4	70.7	1.2
HT1: $\overline{Dec} = 349.4$; $\overline{Inc} = 62.1$; $\alpha_{95} = 10.96$; $R = 3.9578$; $K = 71.1824$; $N = 4$ Fecha Probable: 1470- 1500 d. C.					

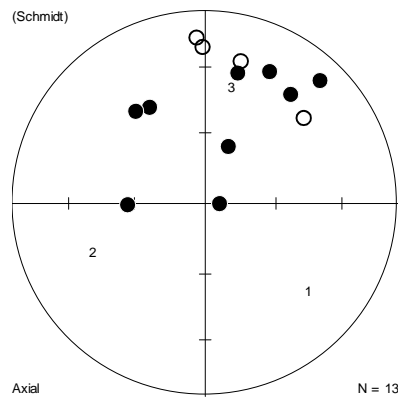
Tabla 5.3: Declinación e inclinación promedio de la muestra HT1.



Gráfica 5.2: Curva de variación secular con el fechamiento correspondiente a la muestra HT1.

Muestra HT2

Se midieron 13 especímenes en la muestra HT2, las mediciones NRM de cada espécimen y la red estereográfica de esta muestra aparecen a continuación.



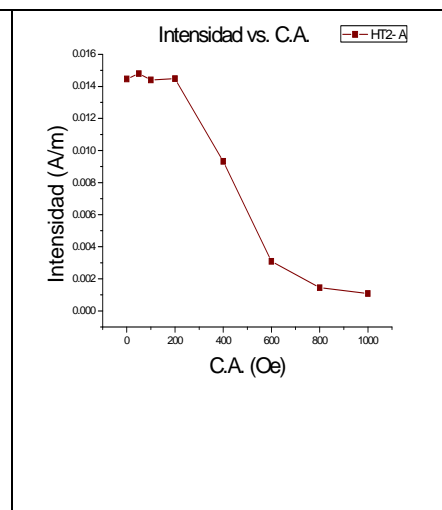
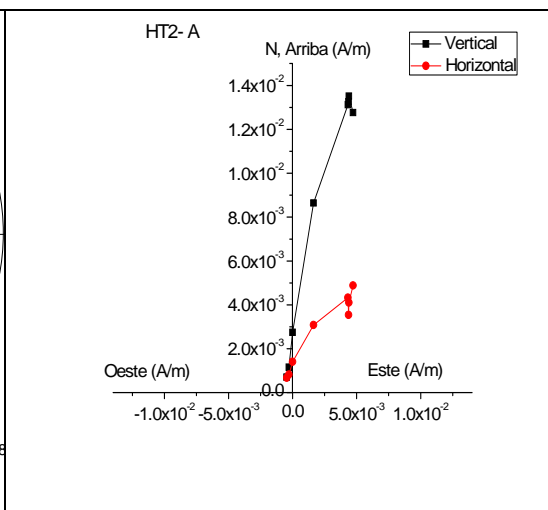
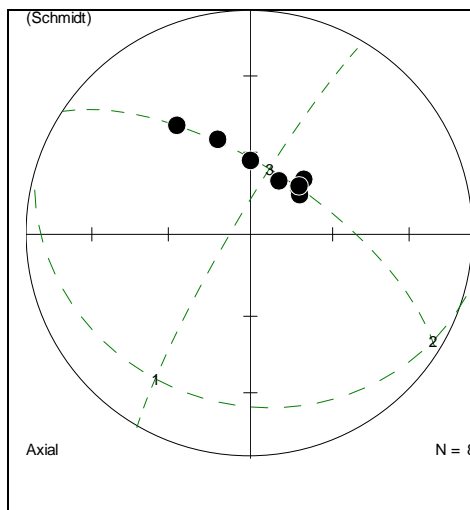
Gráfica 5.3: Red estereográfica de la medición NRM para la muestra HT2.

A continuación se muestra una tabla de la declinación e inclinación de todos los especímenes de la muestra.

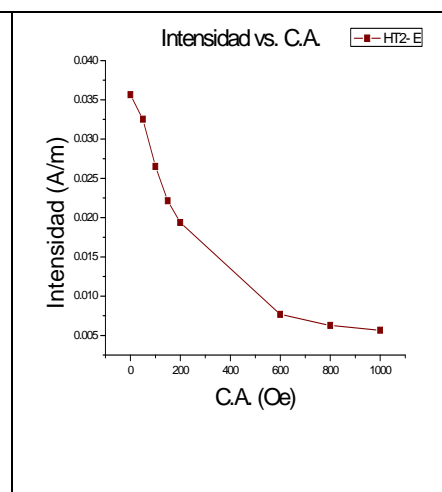
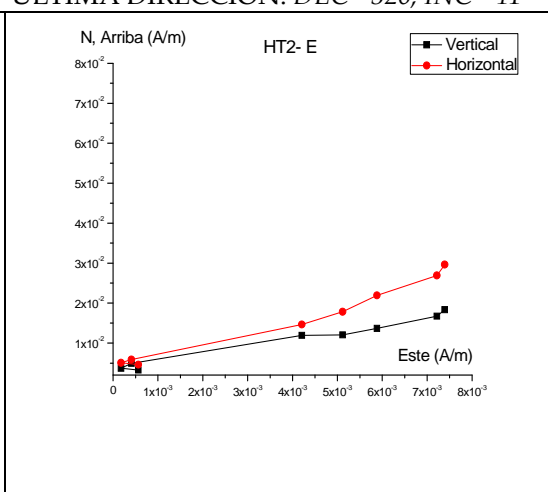
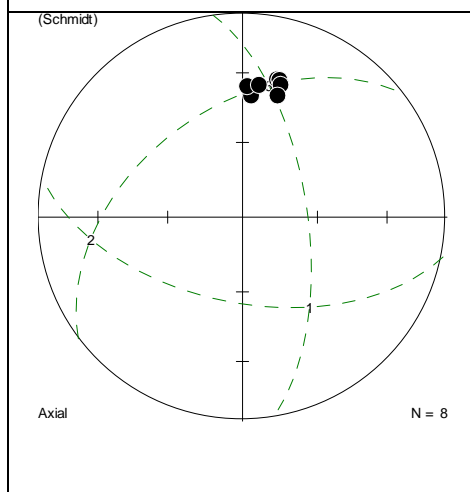
Muestra HT2-	Declinación	Inclinación	NRM	Desmagnetizada
A	44.2	65.6		X
B	49	-33	X	
C	38	29	X	
D	91	84	X	
E	14.2	32.3		X
F	14	-25	X	
El error en este espécimen fue muy grande				
G	322.4	44.1		X
H	357	-15.4		X
I	359.5	-21		X
J	319.1	40.6		X
K	269	57	X	
L	30	22.6		X
M	48.6	9.6		X

Tabla 5.4: Mediciones de declinación e inclinación para cada espécimen de la muestra HT2.

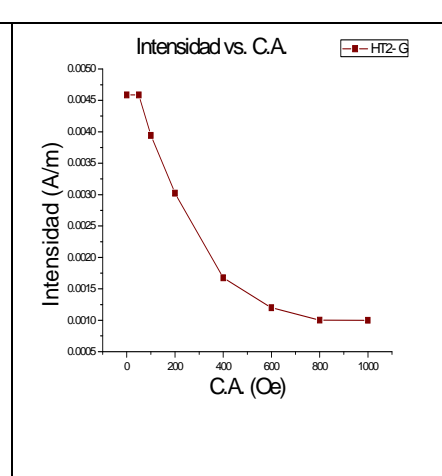
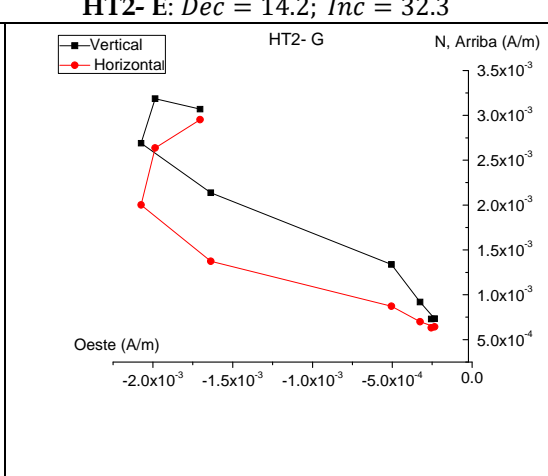
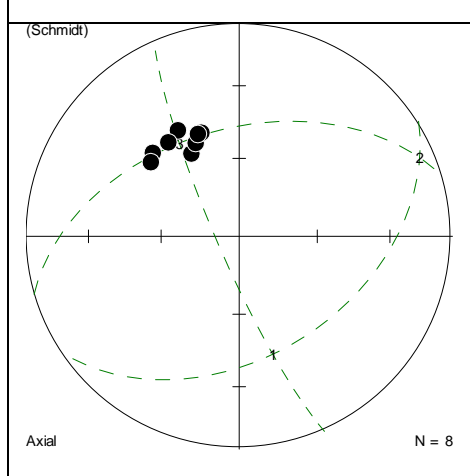
Posteriormente se seleccionaron 2 especímenes de la muestra, los cuales son pilotos (HT2-E, L) y se seleccionaron otros 6 especímenes para desmagnetizarlos en pasos cortos, éstos fueron los siguientes: HT2- A, G, H, I, J, M. A continuación se muestran la curva de desmagnetización, diagrama de Zijdeveld y proyección estereográfica de cada espécimen desmagnetizado.



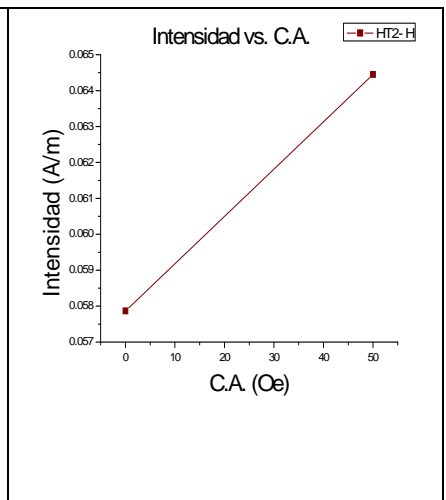
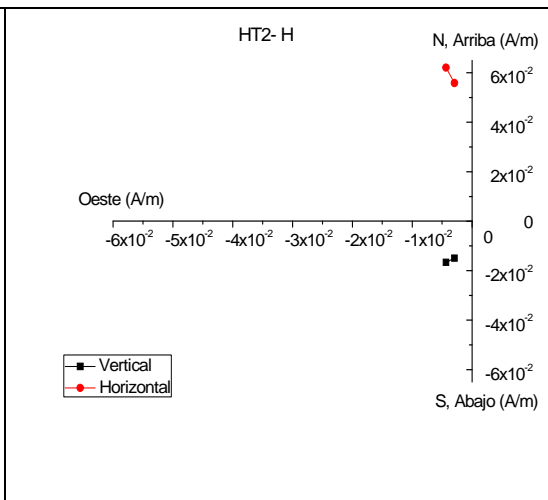
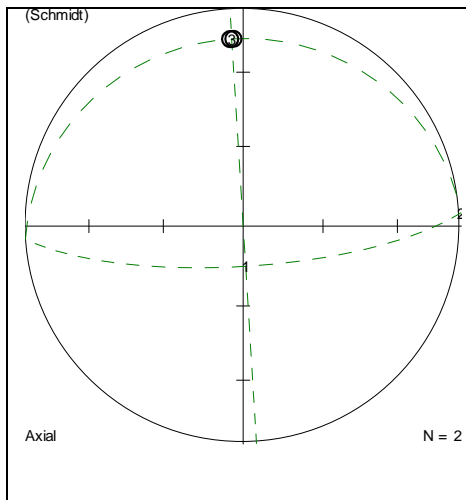
HT2-A: $\overline{Dec} = 44.2$; $\overline{Inc} = 65.6$
 ÚLTIMA DIRECCIÓN: $DEC = 326$; $INC = 41$



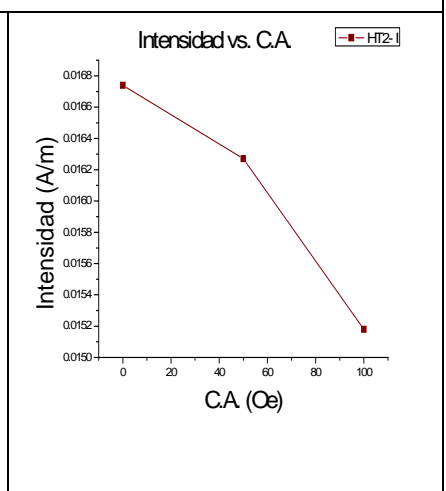
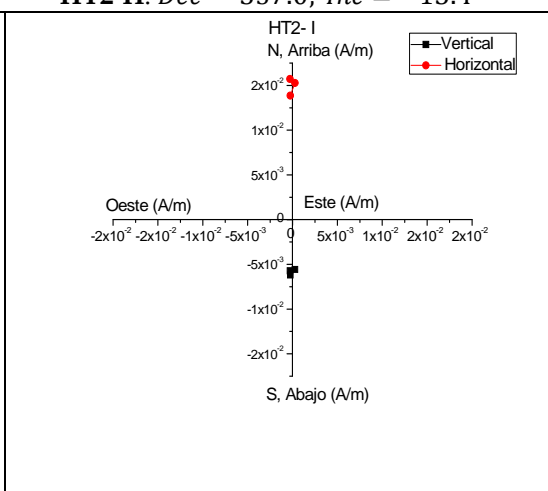
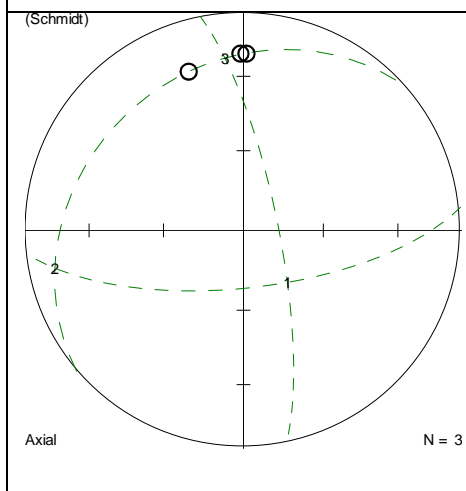
HT2-E: $\overline{Dec} = 14.2$; $\overline{Inc} = 32.3$



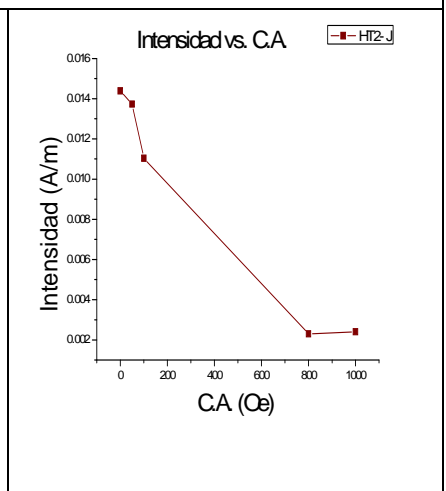
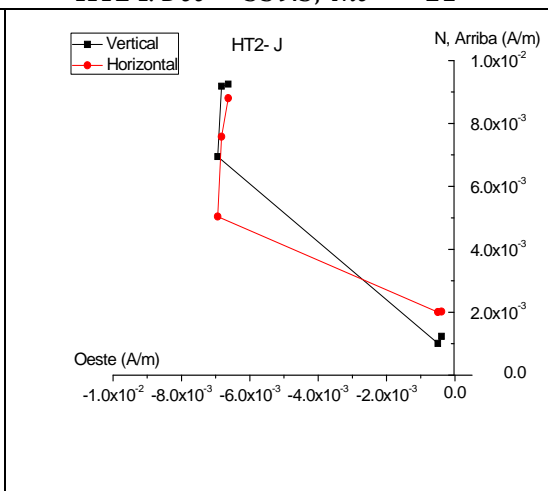
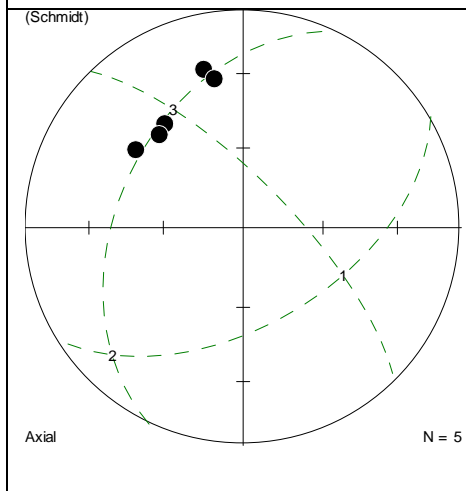
HT2-G: $\overline{Dec} = 322.4$; $\overline{Inc} = 44.1$



HT2-H: $\overline{Dec} = 357.0$; $\overline{Inc} = -15.4$



HT2-I: $\overline{Dec} = 359.5$; $\overline{Inc} = -21$



HT2-J: $\overline{Dec} = 319.1$; $\overline{Inc} = 40.6$

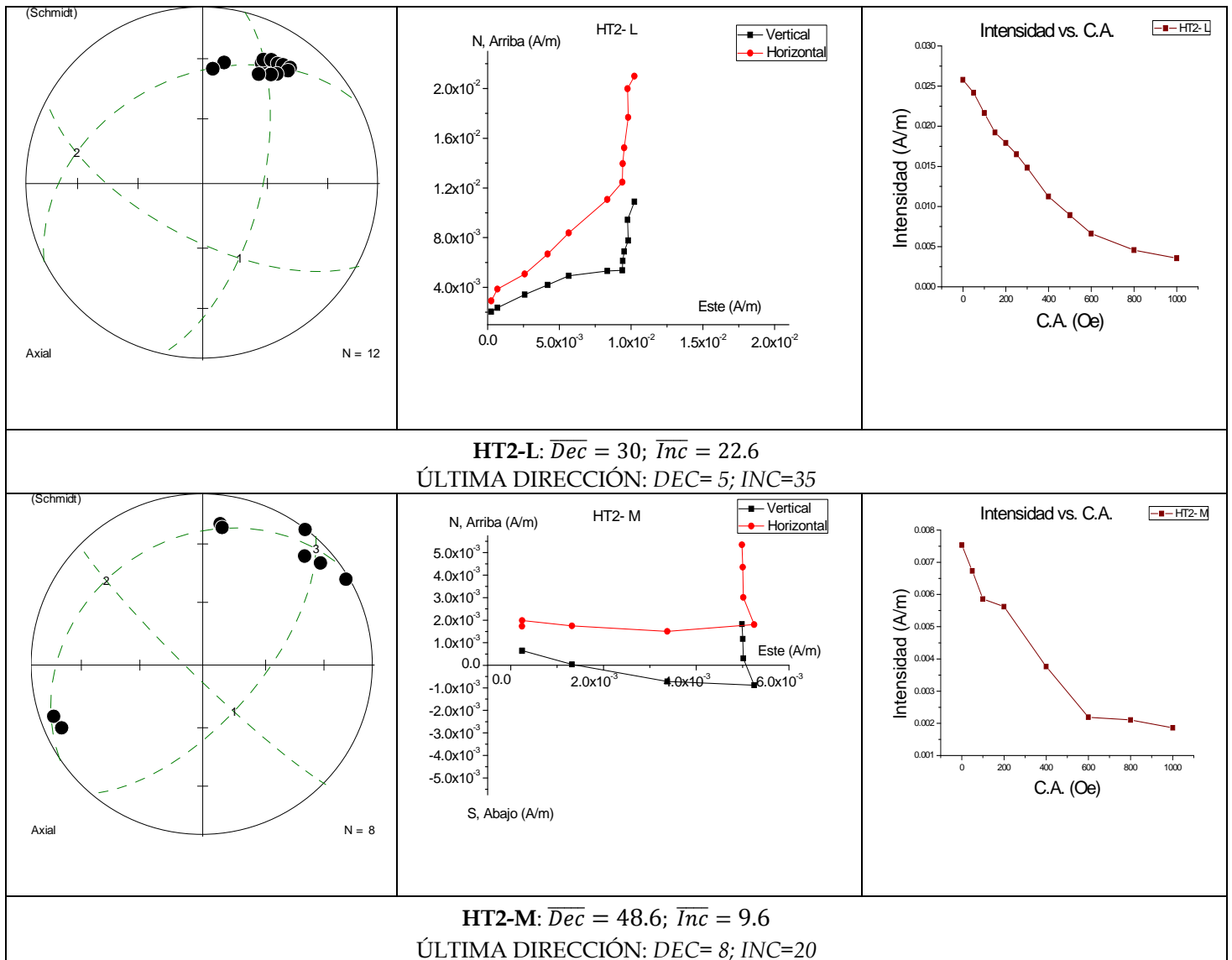


Tabla 5.5: Proyecciones estereográficas, diagramas de Zijderveld y gráfica de Intensidad VS. C.A. para los especímenes seleccionados en la muestra HT2.

De la tabla 5.5 y de la tabla 5.6 se observa que los especímenes HT2- A, E, G, J, L, M presentan dos direcciones, una de ellas tendiente al origen. Los especímenes HT2- H, I no presentan una dirección clara y polaridad reversa. Puesto que al momento de medirlas en el magnetómetro de giro JR6, éstas presentaron mucho ruido, ya no se terminaron de desmagnetizar.

Por lo tanto, se seleccionaron los especímenes HT2- A, E, G, J, L, M para analizarlos en el programa FISH1.BAS y se obtuvo la declinación y la inclinación promedio de la muestra como también su diagrama estereográfico.

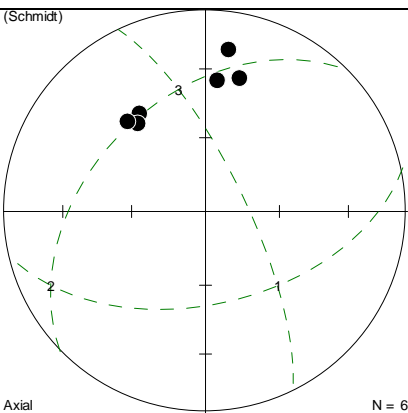
HT2		Muestra	Declinación	Inclinación	MAD
		HT2- A	326	41	Última dirección
		HT2- E	14.2	32.3	3.1
		HT2- G	322.4	44.1	6.2
		HT2- J	319.1	40.6	7.6
		HT2- L	5	35	Última dirección
		HT2- M	8	20	Última dirección
HT2: $\overline{Dec} = 347.7$; $\overline{Inc} = 37.9$; $\alpha_{95} = 19.1$; $R = 5.622$; $K = 13.23$; $N = 6$					

Tabla 5.6: Declinación e inclinación promedio de la muestra HT2.

Como podemos observar en la red estereográfica de la tabla 5.6, se observan dos direcciones, las cuales se muestran a continuación y por tanto se calcularon ambas.

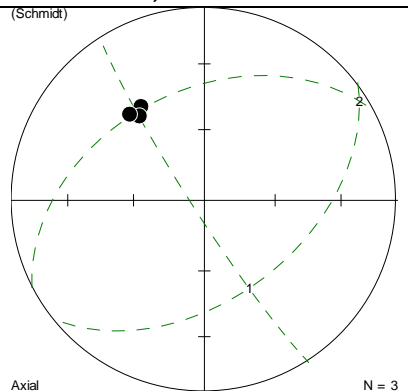
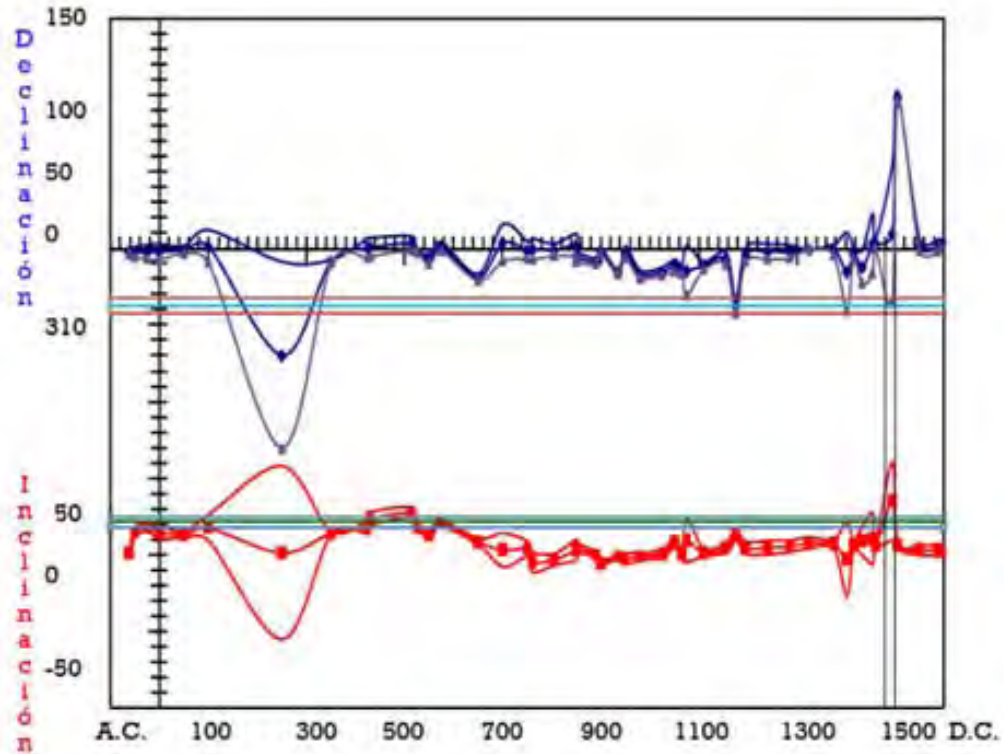
HT2, Dirección 1		Muestra	Declinación	Inclinación	MAD
		HT2- A	326	41	Última dirección
		HT2- G	322.4	44.1	6.2
		HT2- J	319.1	40.6	7.6
HT2 (Dir. 1): $\overline{Dec} = 322.5$; $\overline{Inc} = 41.9$; $\alpha_{95} = 4.9$; $R = 2.997$; $K = 632.8$; $N = 3$ Fecha Probable: 1480- 1500 d. C					

Tabla 5.7: Declinación e inclinación para la dirección 1 de la muestra HT2.



Gráfica 5.4: Curva de variación secular con el fechamiento correspondiente a la dirección 1 de la muestra HT2.

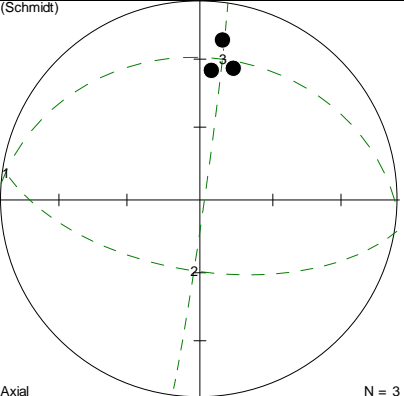
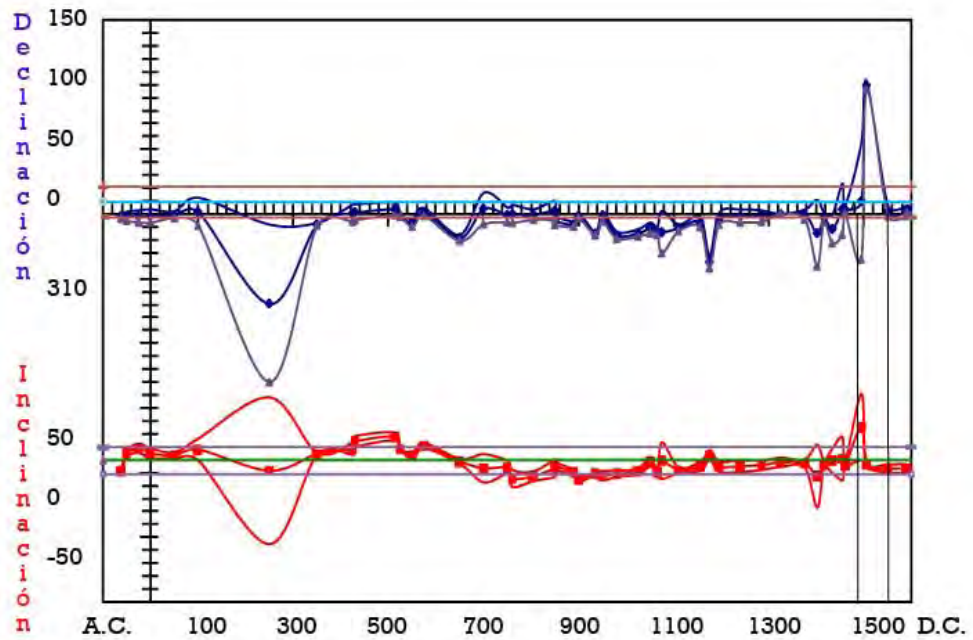
HT2, Dirección 2		Muestra	Declinación	Inclinación	MAD
(Schmidt) 	HT2- E	14.2	32.3	3.1	
	HT2- L	5	35	Última dirección	
	HT2- M	8	20	Última dirección	
HT2 (Dir. 2): $\overline{Dec} = 9.1$; $\overline{Inc} = 29.2$; $\alpha_{95} = 13.7$; $R = 2.976$; $K = 82.14$; $N = 3$ Fecha Probable: 1490- 1545 d.C.					

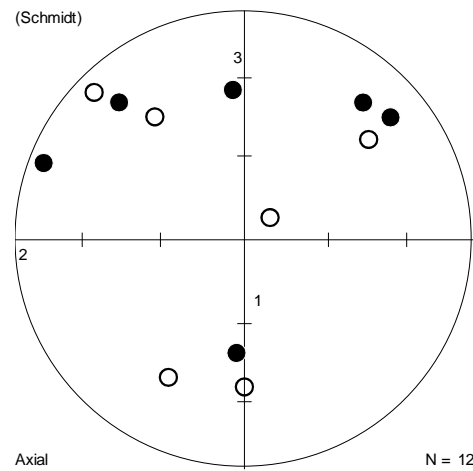
Tabla 5.8: Declinación e inclinación para la dirección 2 de la muestra HT2.



Gráfica 5.5: Curva de variación secular con el fechamiento correspondiente a la dirección 2 de la muestra HT2.

Muestra HT3

Se midieron 12 especímenes en la muestra HT3, primeramente se obtuvieron las mediciones NRM de cada espécimen y se graficó una red estereográfica (Gráfica 5.6).



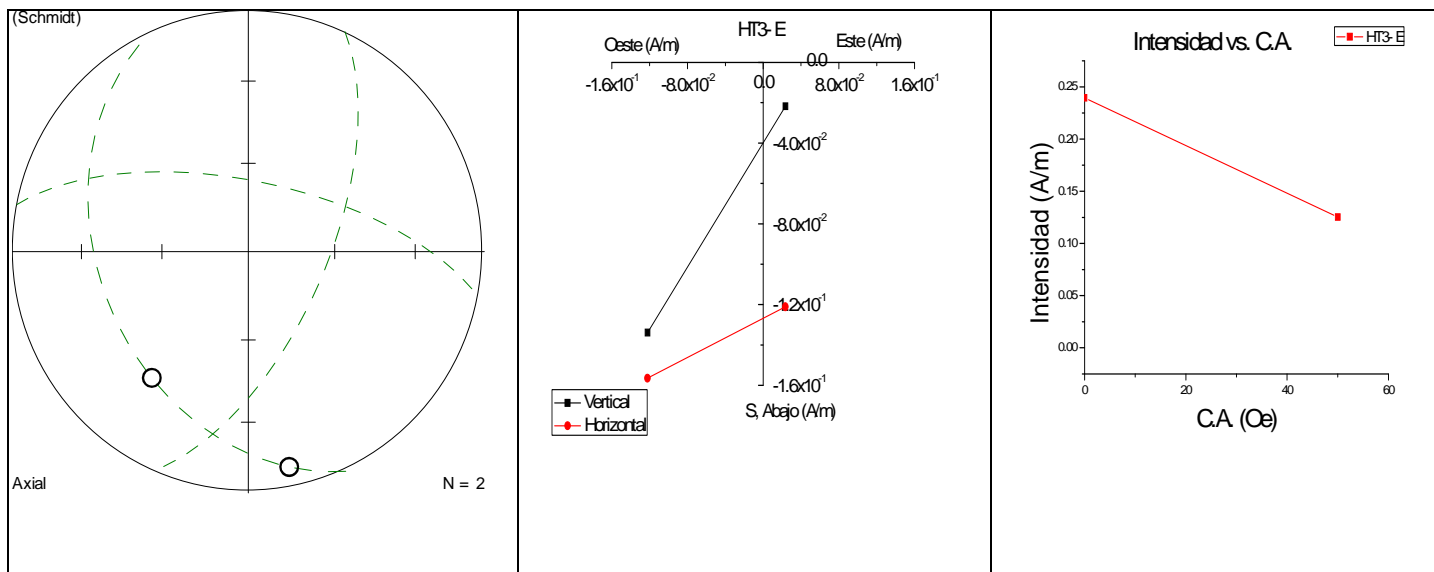
Gráfica 5.6: Red estereográfica de la medición NRM para la muestra HT3.

A continuación se muestra una tabla de la declinación e inclinación de todos los especímenes de la muestra.

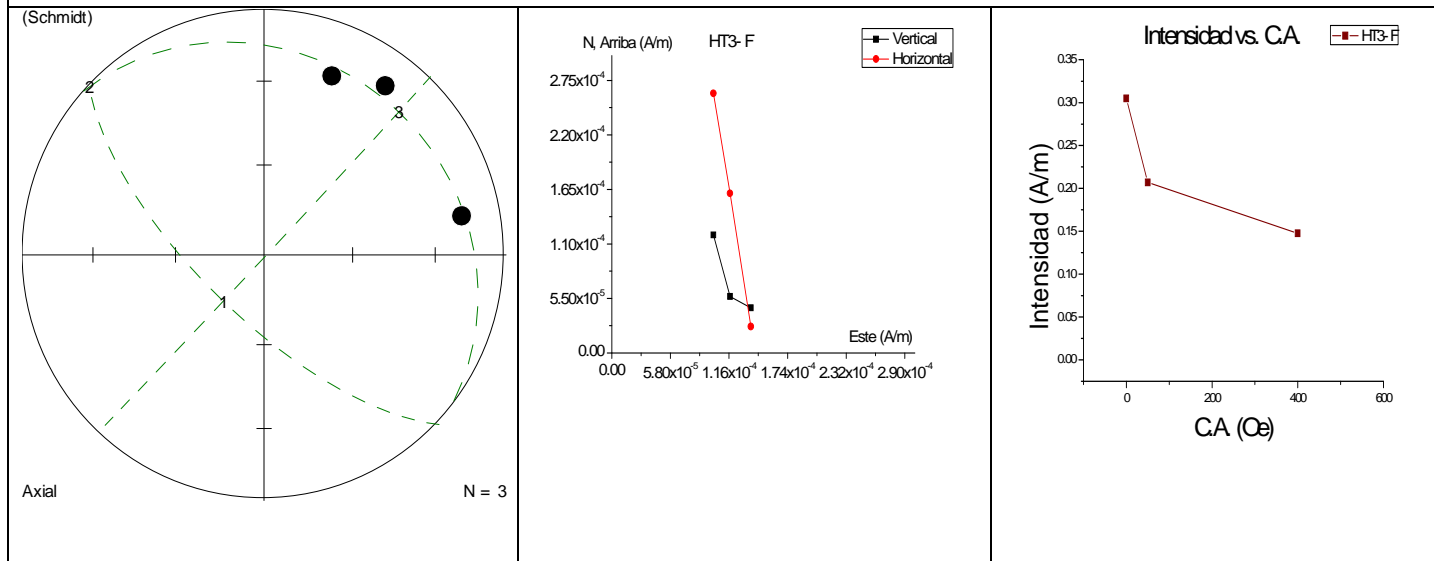
Muestra HT3-	Declinación	Inclinación	NRM	Desmagnetizada
A	184	49	X	
B	291	7	X	
C	51	-31	X	
D	50	18	X	
E	208.9	-31.5		X
F	40.8	21.9		X
G	180	-36	X	
H	355.9	35.6		X
I	324	-34	X	
J	314.5	-8.5		X
K	49	-78	X	
L	317.7	20		X

Tabla 5.9: Mediciones de declinación e inclinación para cada espécimen de la muestra HT3.

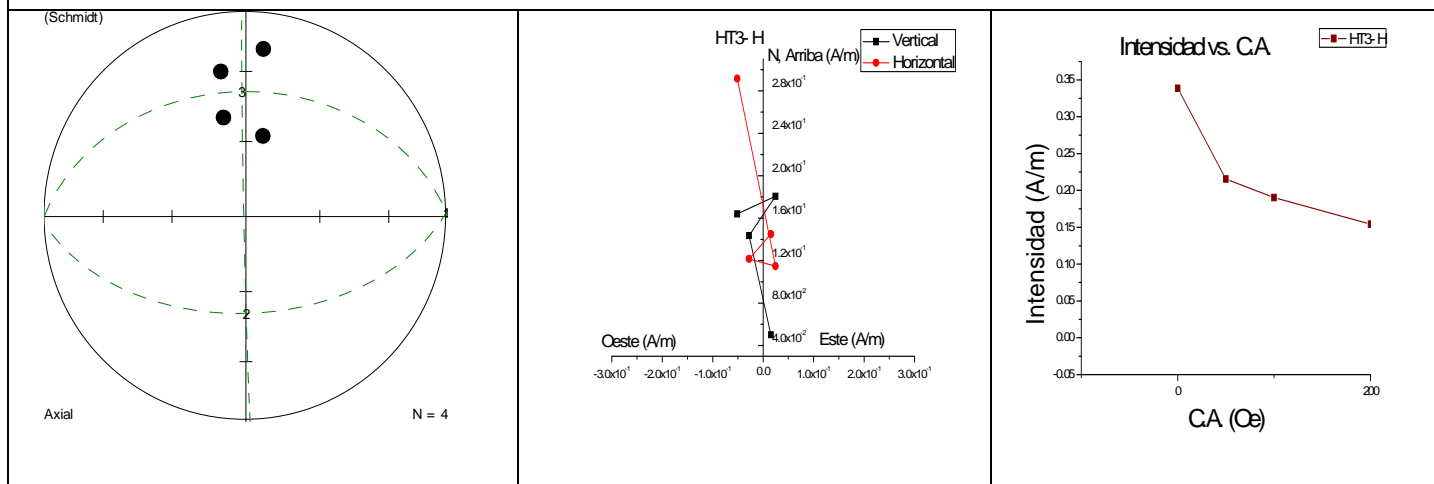
Dado que las muestras presentan polaridades normales y reversas se seleccionaron 2 especímenes de la muestra como pilotos (HT3- E, H) y de su proceso se seleccionaron otros 3 especímenes para desmagnetizarlos en pasos cortos, éstos fueron los siguientes: HT3- F, J, L. Por cada espécimen se realizó su curva de desmagnetización, su diagrama de Zijderveld y la red estereográfica. A continuación se muestran se las gráficas mencionadas.



HT3-E: $\overline{Dec} = 208.9$; $\overline{Inc} = -31.5$



HT3-F: $\overline{Dec} = 40.8$; $\overline{Inc} = 21.9$



HT3-H: $\overline{Dec} = 355.9$; $\overline{Inc} = 35.6$

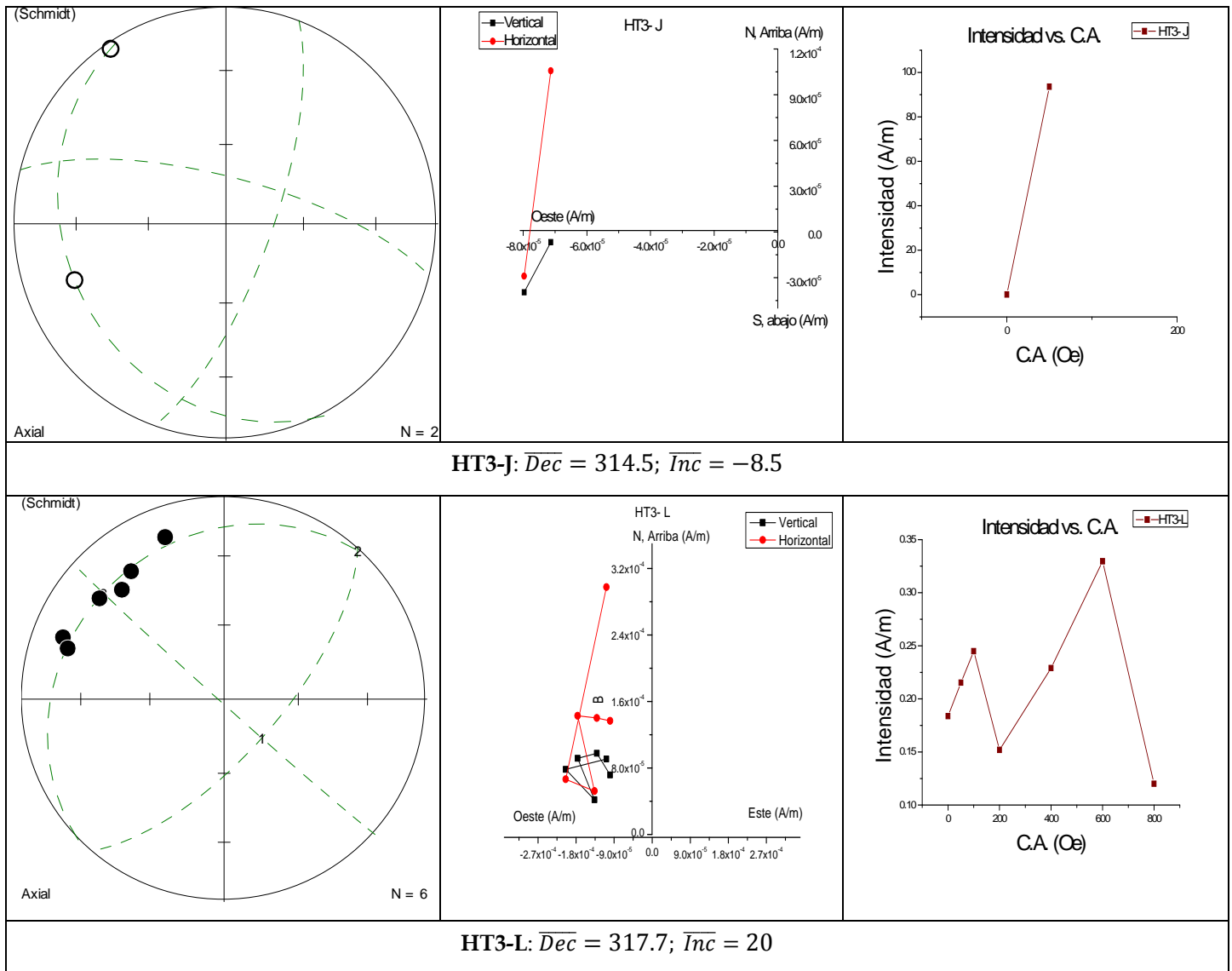
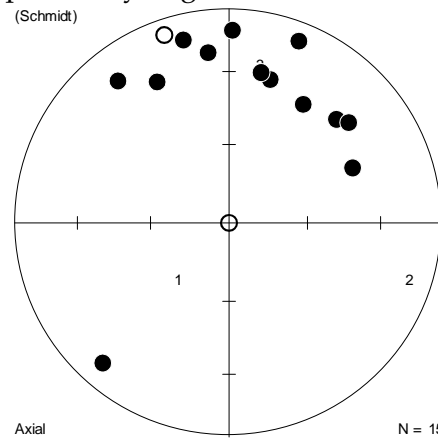


Tabla 5.10: Proyecciones estereográficas, diagramas de Zijderveld y gráfica de Intensidad vs. C.A. para los especímenes seleccionados en la muestra HT3.

Para esta muestra, no fue posible determinar la dirección, ya que en el espécimen HT3- L la intensidad aumento, y en los demás especímenes no fue posible tener los suficientes datos de desmagnetización, puesto que la intensidad en las muestras fue creciendo y presentaron mucho ruido. En la red estereográfica de la gráfica 5.6 y en los diagramas de Zijderveld la tabla 5.10 podemos ver que los especímenes no presentan una dirección clara y gran dispersión.

Muestra HT4

Se midieron 15 especímenes en la muestra HT4, primeramente se obtuvieron las mediciones NRM de cada espécimen y se graficó una red estereográfica (Gráfica 5.7).



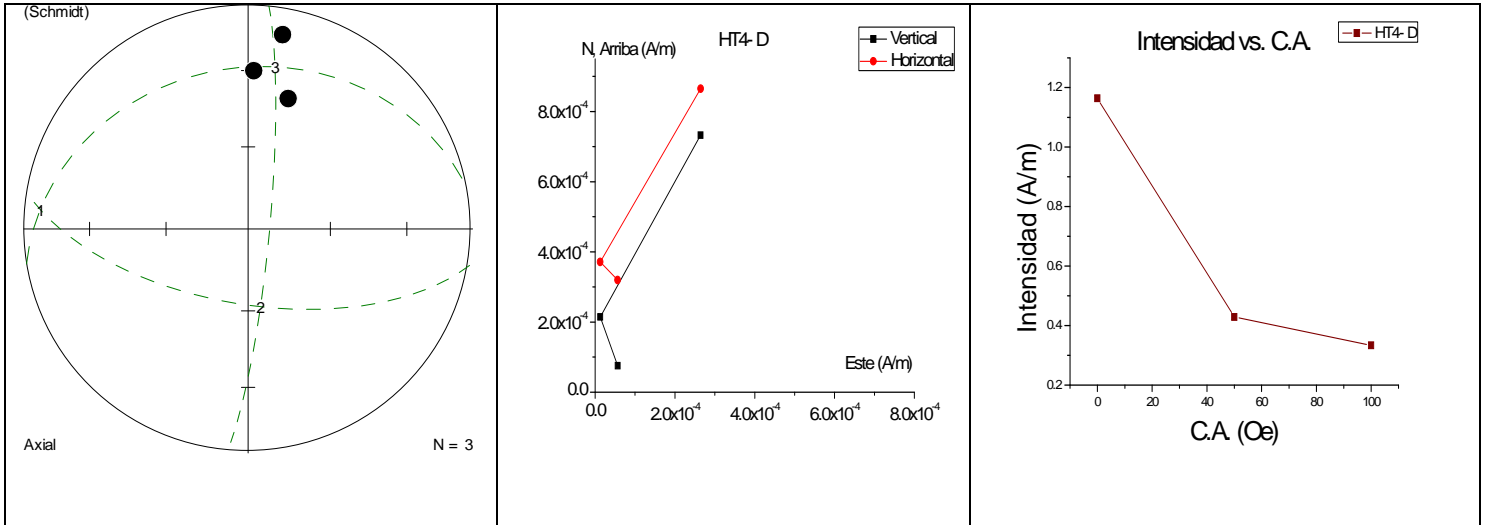
Gráfica 5. 7: Red estereográfica de la medición NRM para la muestra HT4.

En la tabla 5.11 se muestra la declinación e inclinación de todos los especímenes de la muestra.

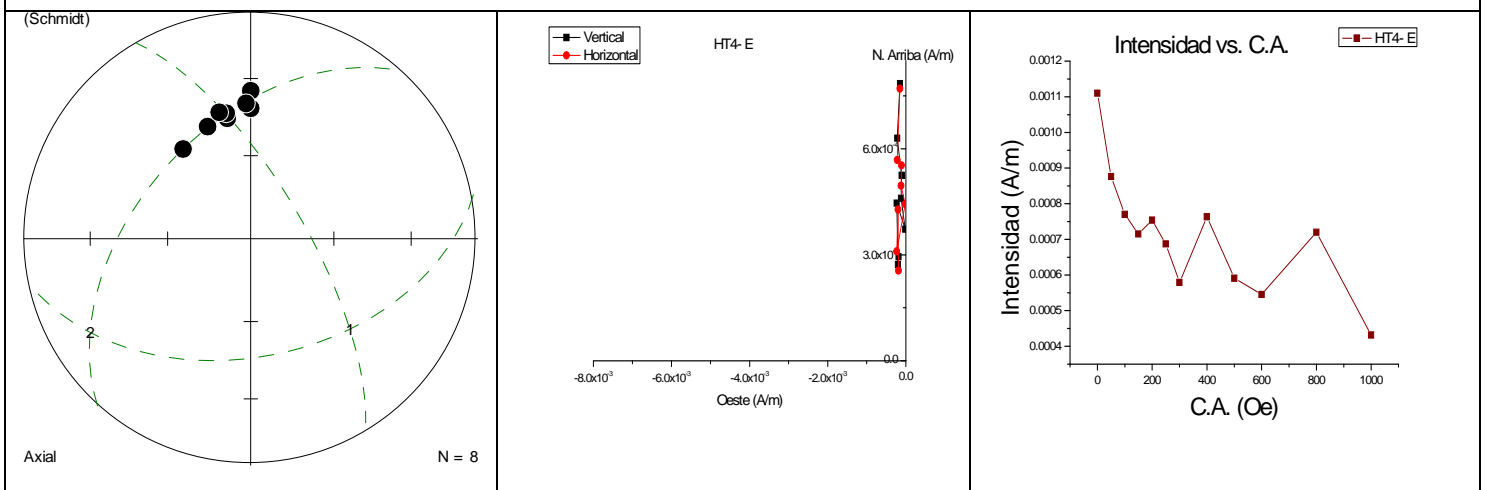
Muestra HT4-	Declinación	Inclinación	NRM	Desmagnetizada
A El error en este espécimen fue muy grande	12	29	X	
B El error en este espécimen fue muy grande	50	28	X	
C	341	-8	X	
D	15	36.8		X
E	348.2	41.6		X
F	46	31	X	
G	359.1	28.3		X
H	308.1	45.1		X
I El error en este espécimen fue muy grande	21	10	X	
J	355.6	37.7		X
K	223.7	5		X
L El error en este espécimen fue muy grande	90	-90	X	
M	32.9	26.9		X
N	66	37	X	
O	16	31	X	

Tabla 5.11: Mediciones de declinación e inclinación para cada espécimen de la muestra HT4.

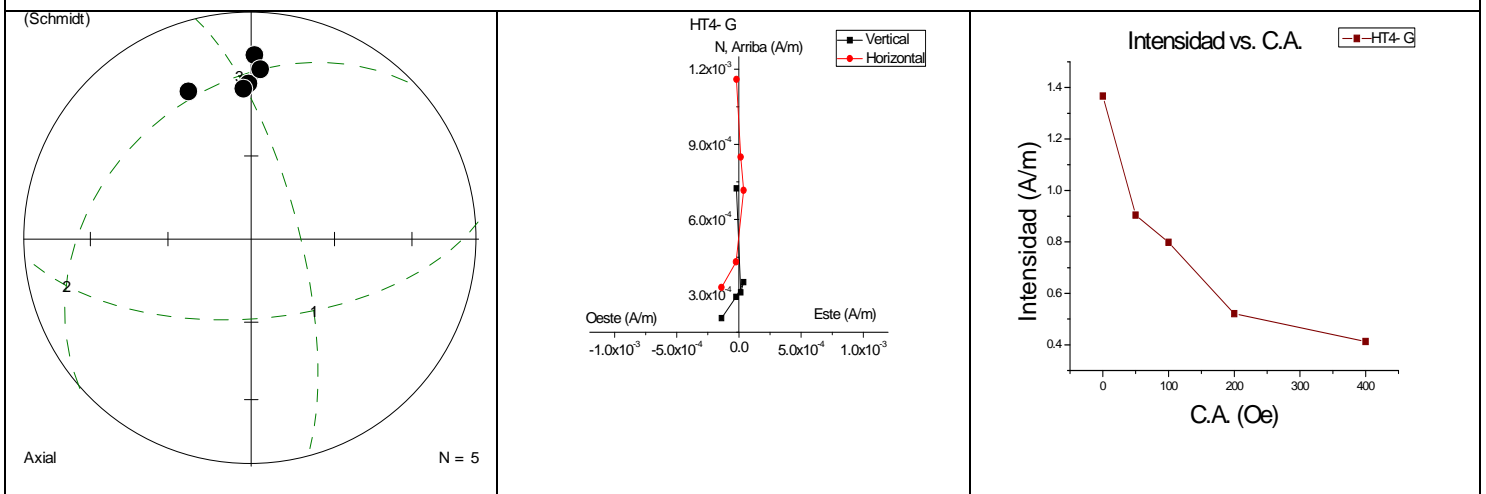
Se seleccionaron 2 especímenes de la muestra, los cuales son pilotos (HT4- E, K) y posteriormente otros 5 especímenes para desmagnetizarlos en pasos cortos, éstos fueron: HT4- D, G, H, J, M. A continuación se muestran las gráficas de desmagnetización diagrama de Zijderveld y red estereográfica de los especímenes que fueron seleccionados para desmagnetizar.



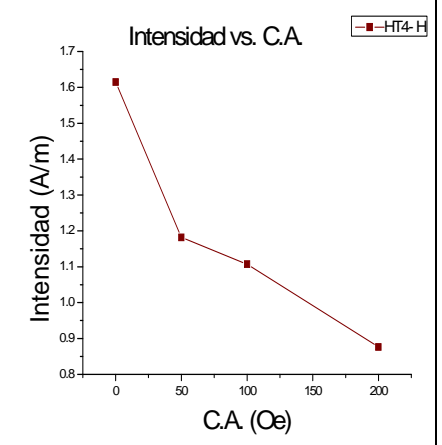
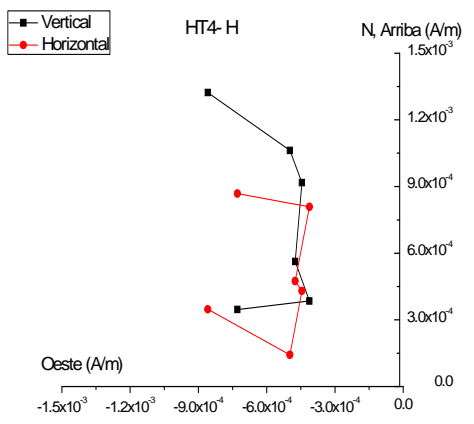
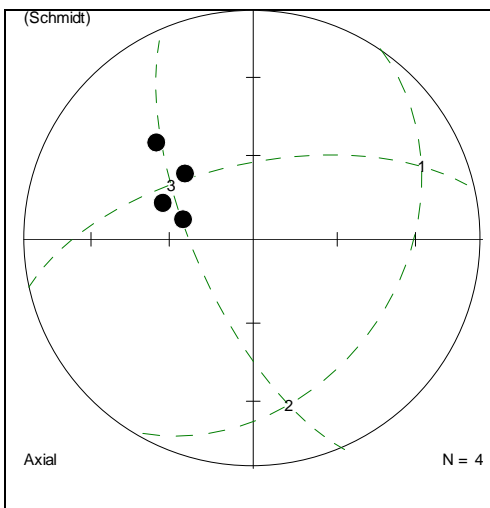
HT4-D: $\overline{Dec} = 15; \overline{Inc} = 36.8$



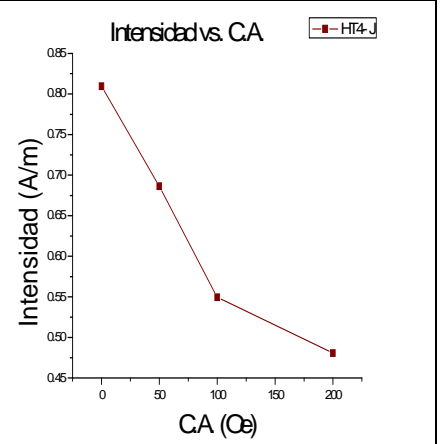
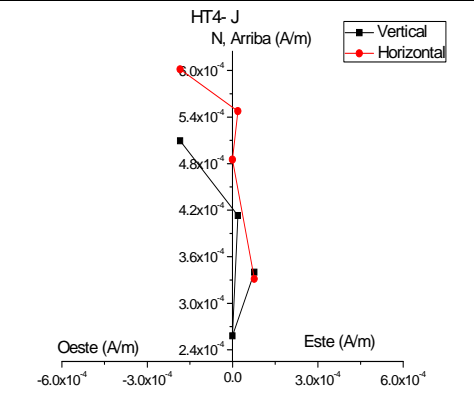
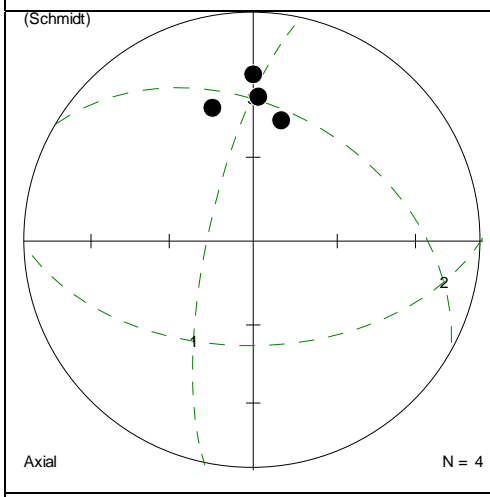
HT4-E: $\overline{Dec} = 348.7; \overline{Inc} = 43.3$



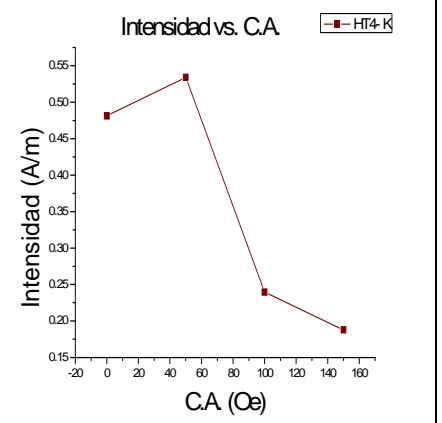
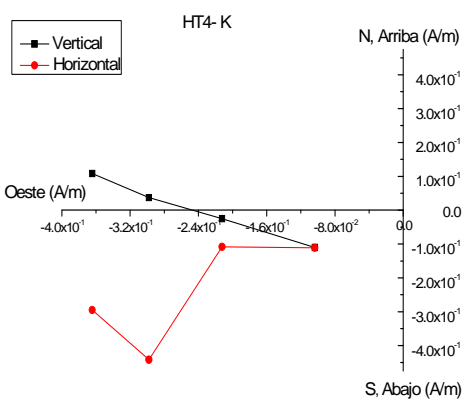
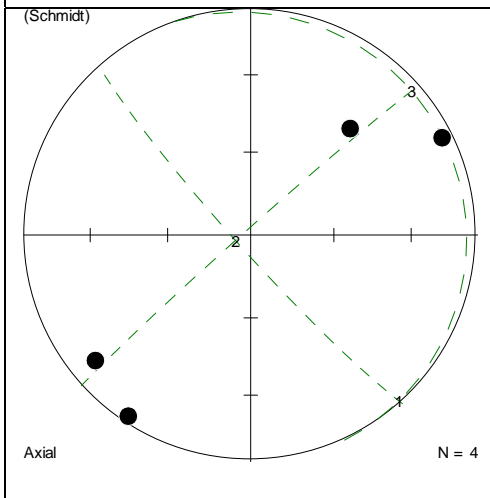
HT4-G: $\overline{Dec} = 359.1; \overline{Inc} = 28.3$



HT4-H: $\overline{Dec} = 308.1$; $\overline{Inc} = 45.6$



HT4-J: $\overline{Dec} = 355.6$; $\overline{Inc} = 37.7$



HT4-K: $\overline{Dec} = 223.7$; $\overline{Inc} = 5$

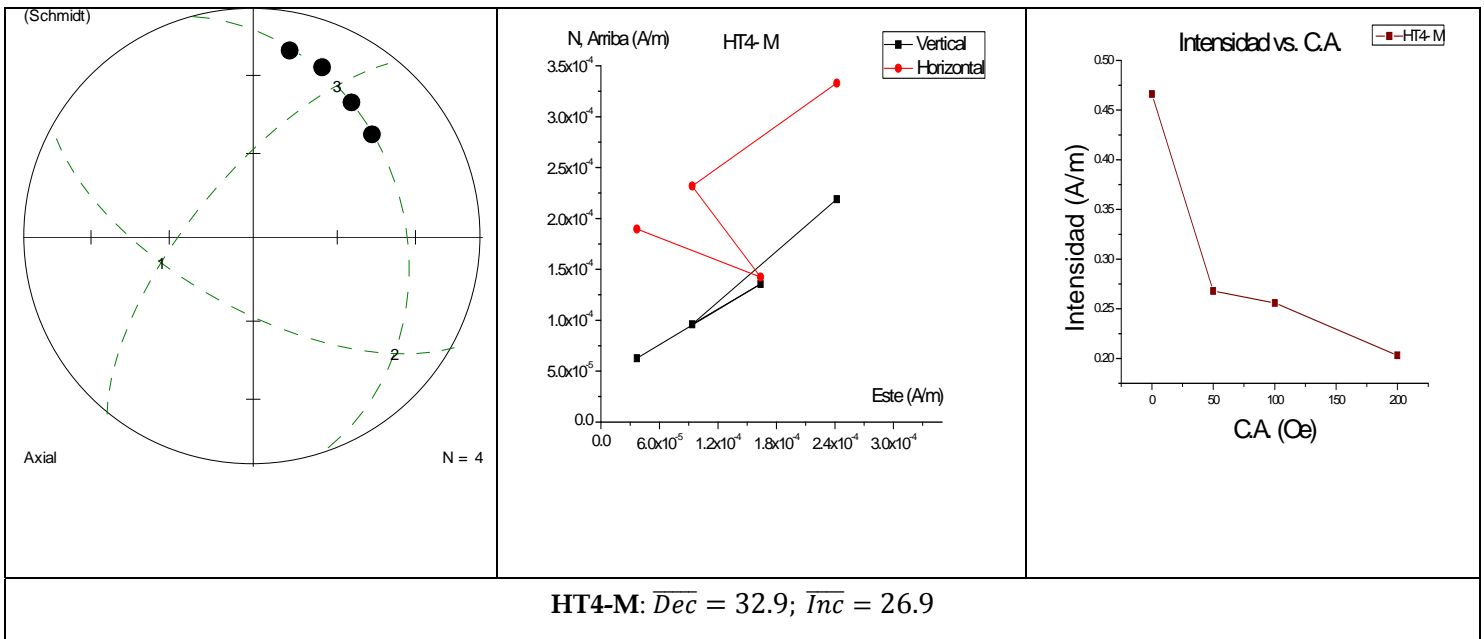
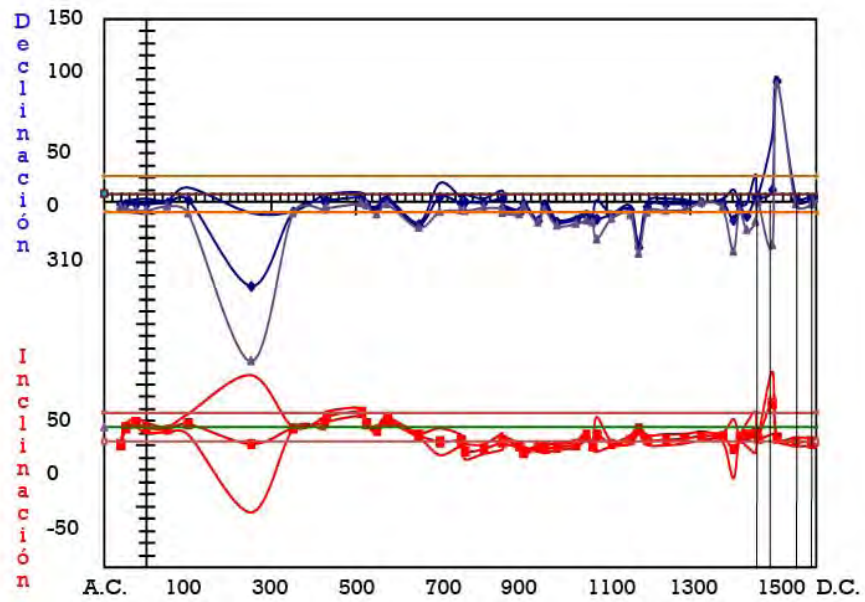


Tabla 5.12: Proyecciones estereográficas, diagramas de Zijderveld y curva de desmagnetización para los especímenes seleccionados en la muestra HT4.

Podemos observar en la tabla 5.12 que los especímenes HT4- D, E, G, J, M presentan una declinación e inclinación dentro de un rango de (345° - 34°), (28° - 45°) respectivamente, y tienden al origen; mientras que los especímenes HT4- H, K presentan mucha dispersión. Por ello, se emplearon los especímenes HT4- D, E, G, J, M para analizarlos en el programa FISH1.BAS y de ahí obtener la declinación y la inclinación promedio de la muestra y su red estereográfica, la cual se muestra en la tabla 5.13. Los especímenes con polaridades reversas fueron eliminados del análisis pues mostraban mucho ruido en la medida.

HT4		Muestra	Declinación	Inclinación	MAD
	(Schmidt)	HT4- D	15	36.8	8
		HT4- E	348.7	43.3	6.8
		HT4- G	359.1	28.3	6.7
		HT4- J	355.6	37.7	9.7
		HT4- M	32.9	26.9	10.6
HT4: $\overline{Dec} = 6.9$; $\overline{Inc} = 35.7$; $\alpha_{95} = 15.5$; $R = 4.842$; $K = 25.30$; $N = 5$ Fechas Probables: 1460- 1490 d.C., 1550- 1590 d.C.					

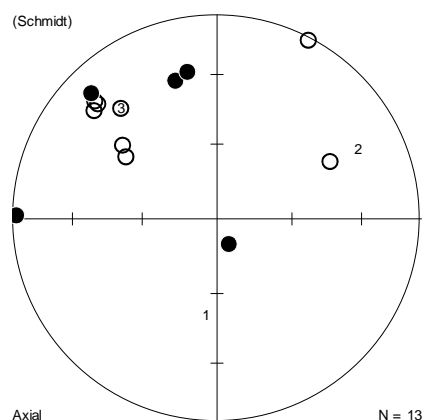
Tabla 5.13: Declinación e inclinación promedio de la muestra HT4.



Gráfica 5.8: Curva de variación secular con el fechamiento correspondiente a la muestra HT4.

Muestra HT5

Se obtuvieron 13 especímenes en la muestra HT5, primeramente se midieron las mediciones NRM de cada espécimen y se graficó en una red estereográfica (Gráfica 5.9).



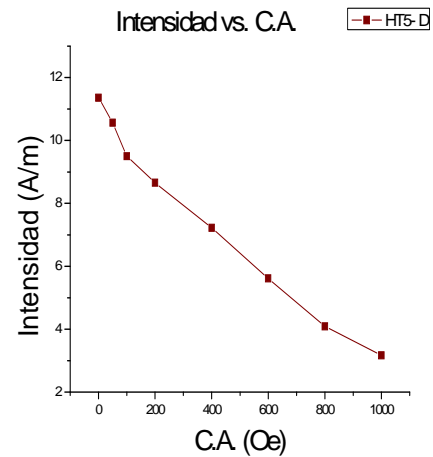
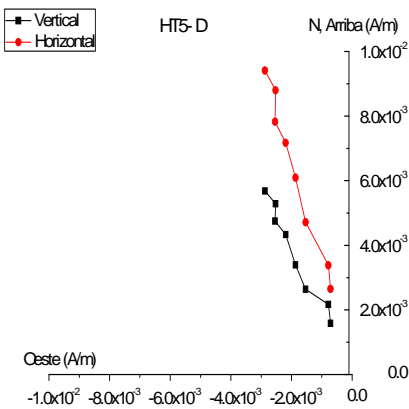
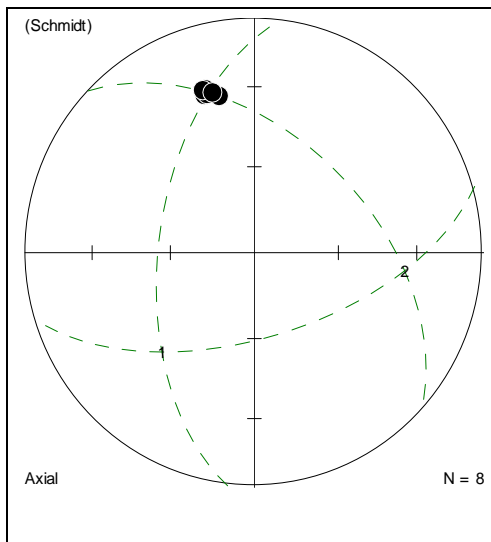
Gráfica 5.9: Red estereográfica de la medición NRM para la muestra HT5.

A continuación se muestra una tabla de la declinación e inclinación de todos los especímenes de la muestra.

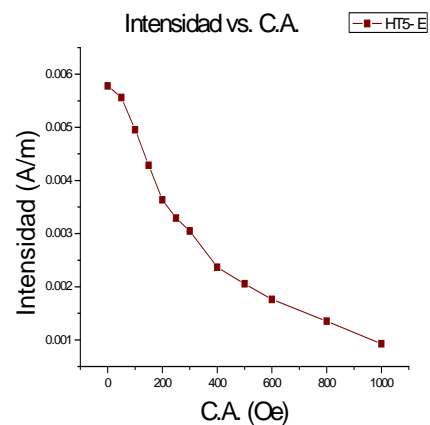
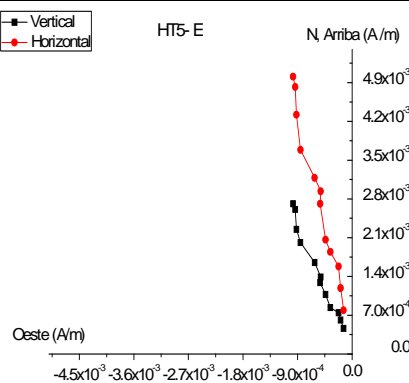
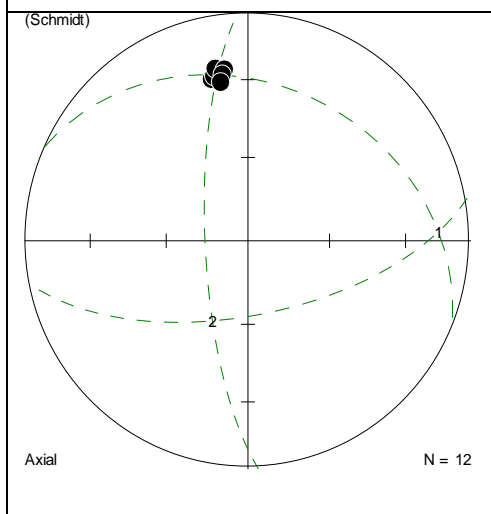
Muestra HT5-	Declinación	Inclinación	NRM	Desmagnetizada
A	271	2	X	
B	155	79	X	
C	315	4	X	
El error en este espécimen fue muy grande				
D	343.2	30.1		X
E	348.6	27.4		X
F	304.3	-45.1		X
G	308	-41	X	
H	311.4	-20.9		X
I	319	-29	X	
J	314	-18	X	
K	314	-20	X	
L	63	-38	X	
M	27	-2	X	

Tabla 5.14: Mediciones de declinación e inclinación para cada espécimen de la muestra HT5.

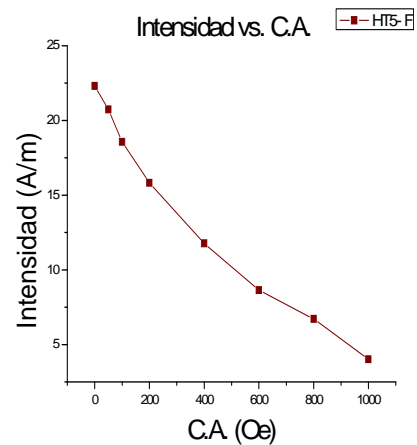
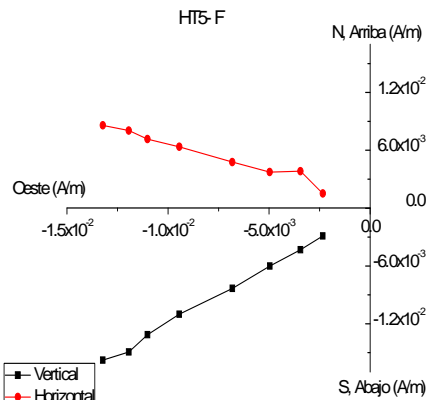
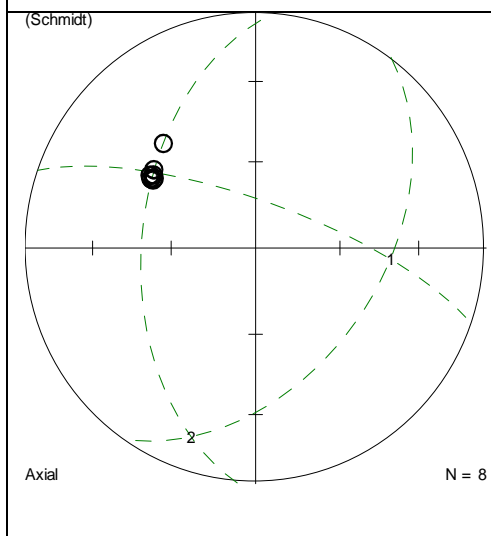
Se seleccionaron 2 especímenes pilotos (HT5- E, H) y se seleccionaron otros 2 especímenes para desmagnetizarlos en pasos cortos, éstos fueron los siguientes: HT5- D, F. A continuación se muestran las siguientes gráficas.



HT5-D: $\overline{Dec} = 343.2$; $\overline{Inc} = 30.1$



HT5-E: $\overline{Dec} = 348.6$; $\overline{Inc} = 27.4$



HT5-F: $\overline{Dec} = 304.3$; $\overline{Inc} = -45.1$

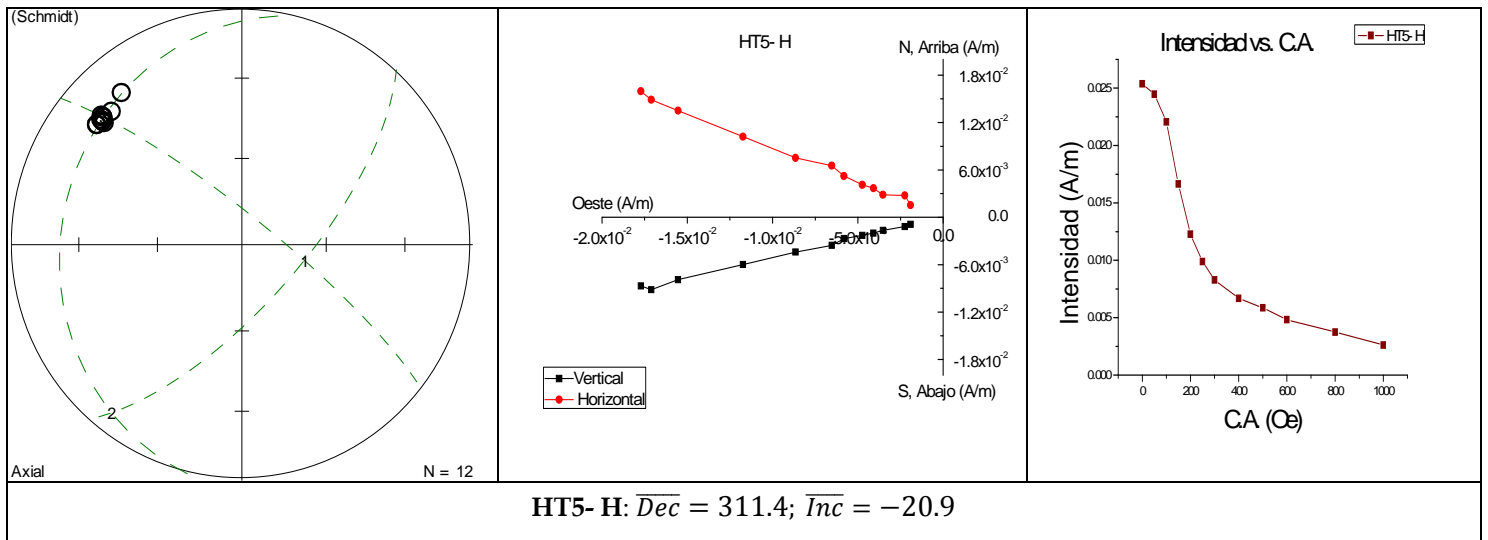
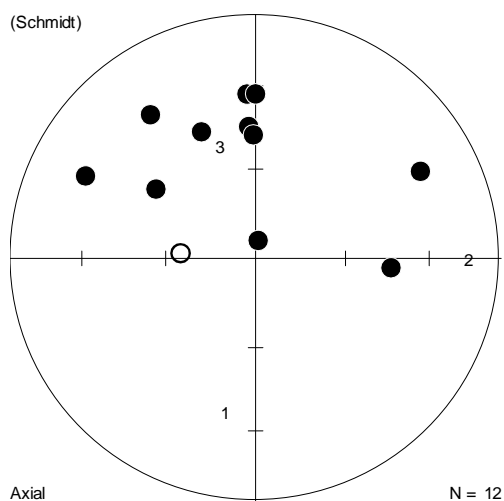


Tabla 5.15: Proyecciones estereográficas, diagramas de Zijderveld y gráfica de Intensidad vs. .C.A. para los especímenes seleccionados en la muestra HT5.

Para esta muestra, no fue posible determinar la dirección, pues como podemos ver, los datos que se tienen son escasos y solo hay dos especímenes con inclinaciones positivas, los otros dos, presentan inclinaciones negativa, que no es posible que se obtenga de manera natural, pues implicarían una inversión del campo magnético; este hecho no puede ser atribuido a dispersión ya que presentan una dirección estable y tendiente al origen. En la red estereográfica de la gráfica 5.9 se observa que los especímenes presentan mucha dispersión.

Muestra HT6

Se midieron 12 especímenes en la muestra HT6, las mediciones NRM de cada espécimen y la red estereográfica de esta muestra aparecen a continuación.



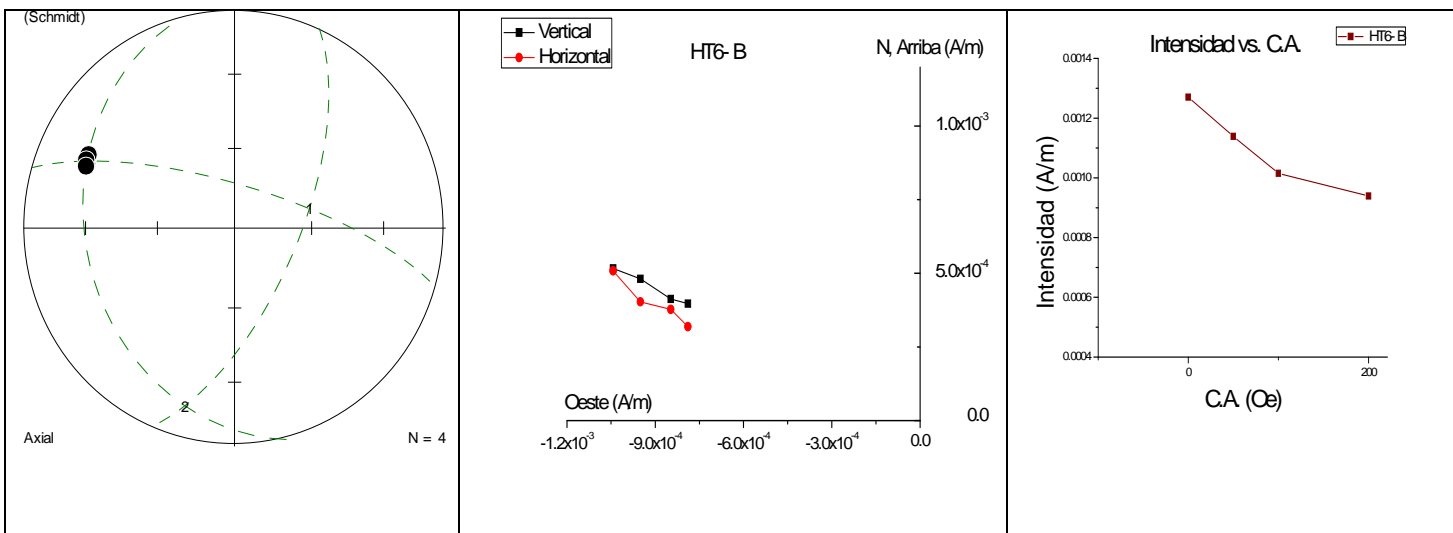
Gráfica 5.10: Red estereográfica de la medición NRM para la muestra HT6.

En la tabla 5.16 se muestra la declinación e inclinación de todos los especímenes de la muestra.

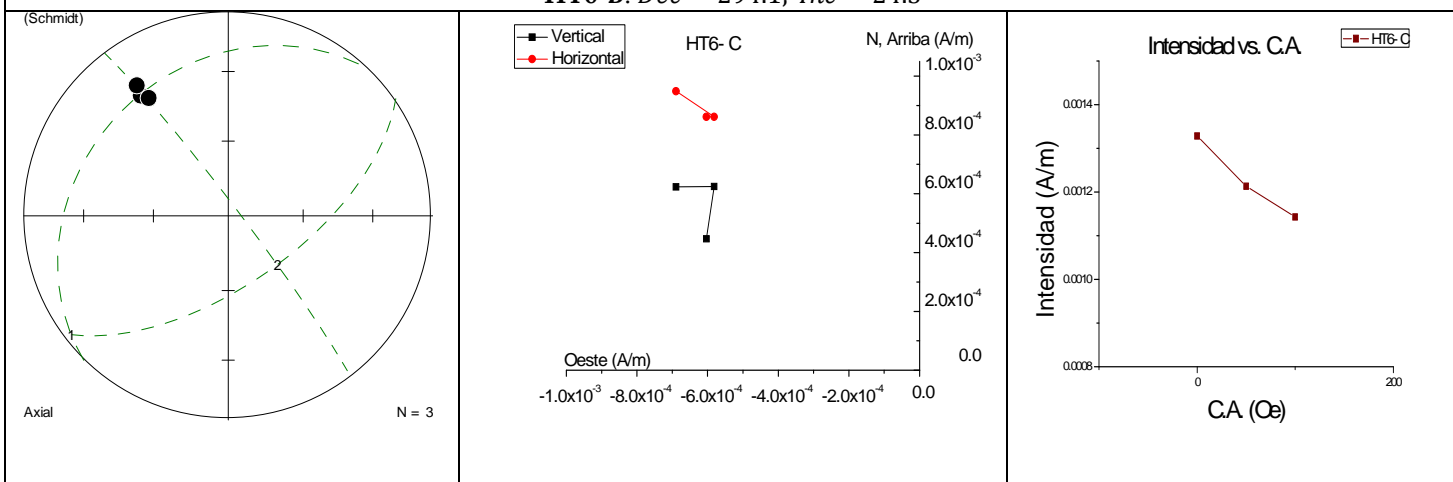
Muestra HT6-	Declinación	Inclinación	NRM	Desmagnetizada
A	305	49	X	
B	294.1	24.3		X
C	324.8	27.6		X
D	337	43	X	
E	232.7	81.8		X
F	310.2	28.3		X
G	59.6	20.7		X
H	360	33	X	
I	94	44	X	
J	272.7	-67		X
K	353.1	41.9		X
L	359.1	46.9		X

Tabla 5.16: Mediciones de declinación e inclinación para cada espécimen de la muestra HT6.

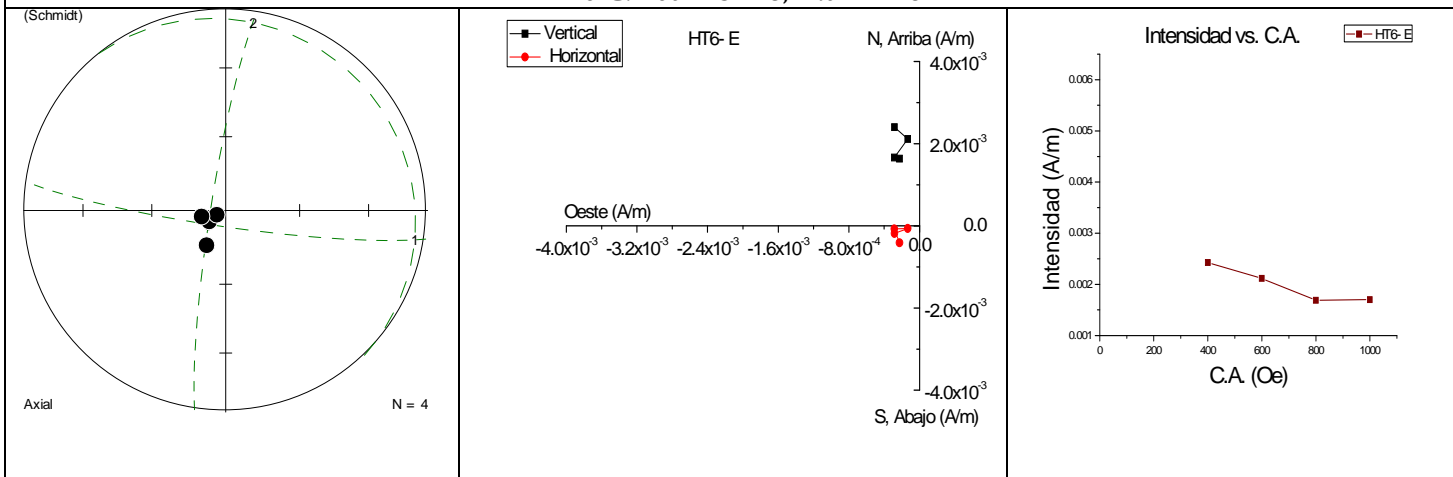
Posteriormente se seleccionaron 2 especímenes pilotos (HT6- G, J) y se seleccionaron otros 6 especímenes para desmagnetizarlos en pasos cortos, éstos fueron los siguientes: HT6- B, C, E, F, K, L. Por cada espécimen se realizaron las gráficas correspondientes.



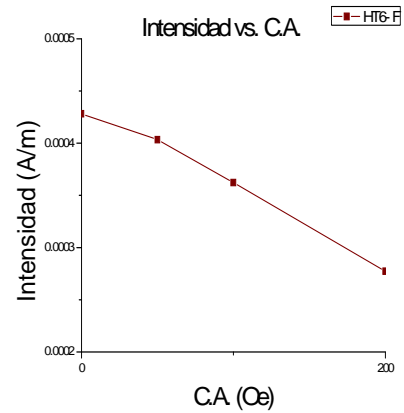
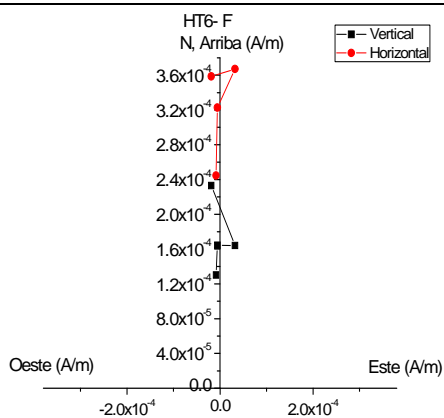
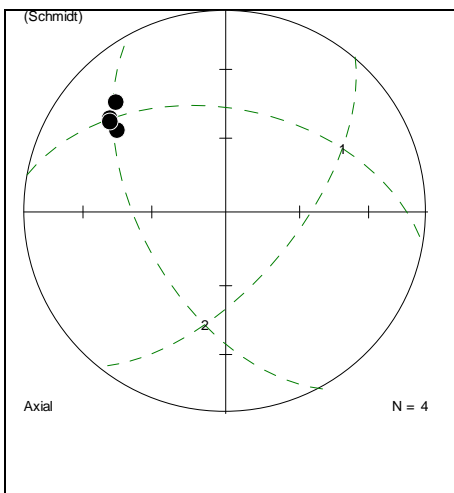
HT6-B: $\overline{Dec} = 294.1; \overline{Inc} = 24.3$



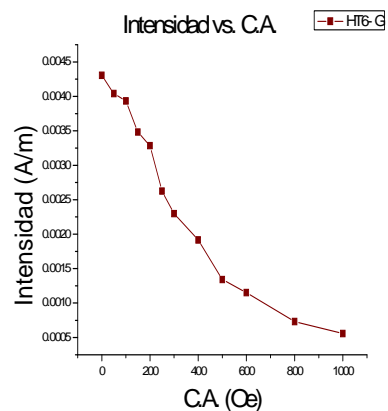
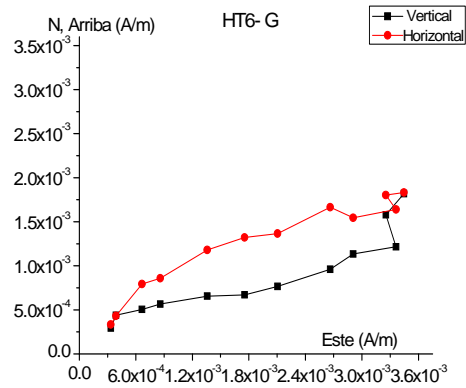
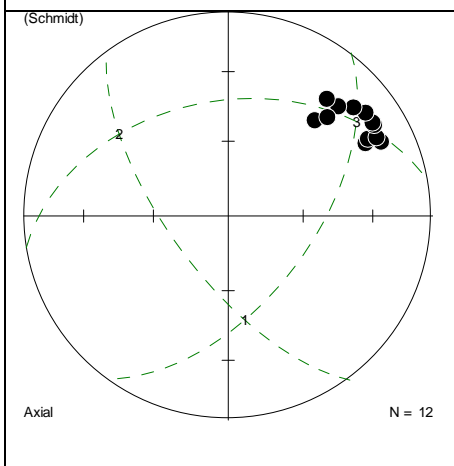
HT6-C: $\overline{Dec} = 324.8; \overline{Inc} = 27.6$



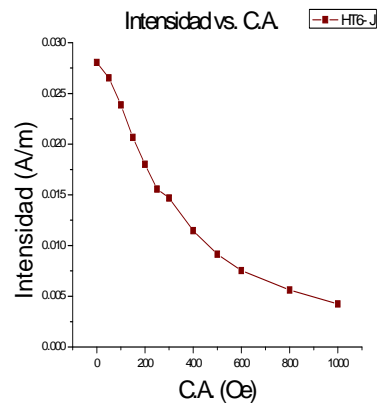
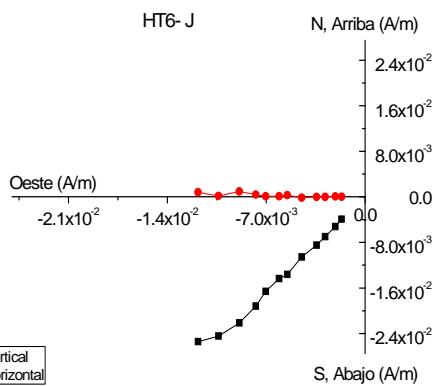
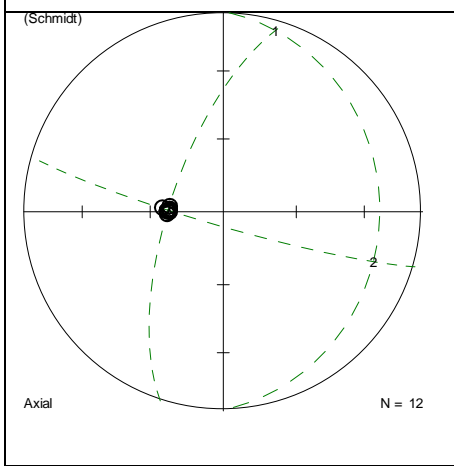
HT6-E: $\overline{Dec} = 232.7; \overline{Inc} = 81.8$



HT6-F: $\overline{Dec} = 310.2$; $\overline{Inc} = 28.3$



HT6-G: $\overline{Dec} = 59.6$; $\overline{Inc} = 20.7$



HT6-J: $\overline{Dec} = 272.7$; $\overline{Inc} = -67$

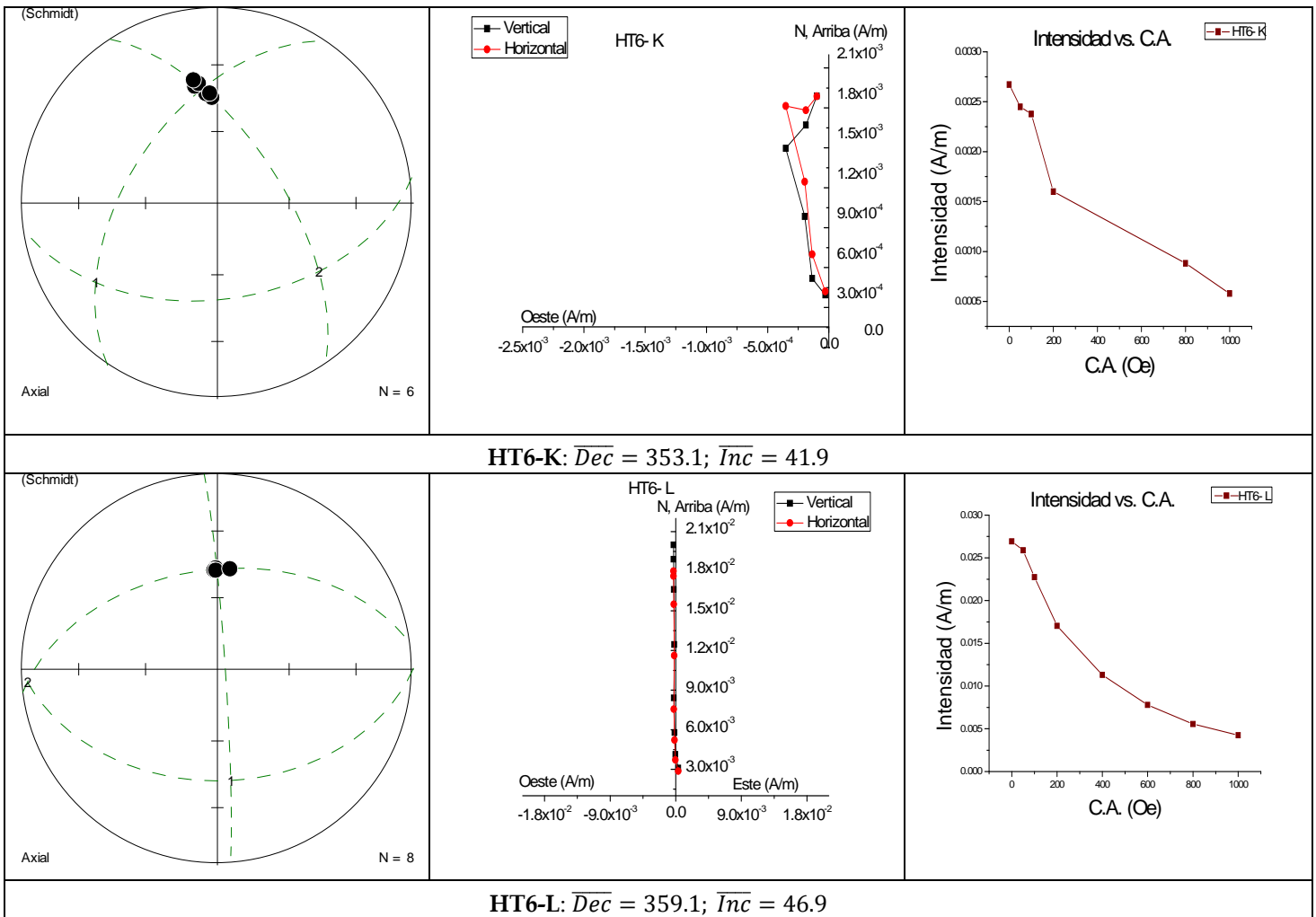


Tabla 5.17: Proyecciones estereográficas, diagramas de Zijderveld y gráfica de Intensidad vs. C.A. para los especímenes seleccionados en la muestra HT6.

En la tabla 5.17 se puede observar que los diagramas de Zijderveld para los especímenes HT6- A, B, C, F, K, L presentan una dirección hacia el origen y una declinación e inclinación similar entre ellos. Mientras que el espécimen HT6- G no presenta una dirección clara y el espécimen HT6- J presenta una inclinación negativa, por lo que fueron retiradas del análisis.

Se seleccionaron los especímenes HT6- A, B, C, F, K, L para analizarlos en el programa FISH1.BAS y se obtuvo la declinación y la inclinación promedio de los especímenes y la red estereográfica promedio, la cual se muestra en la tabla 5.18.

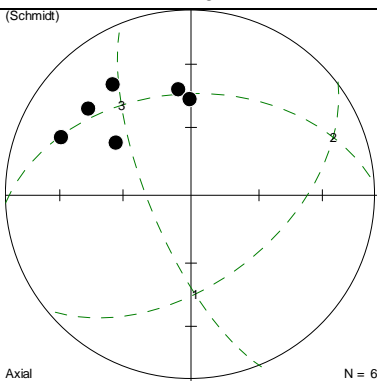
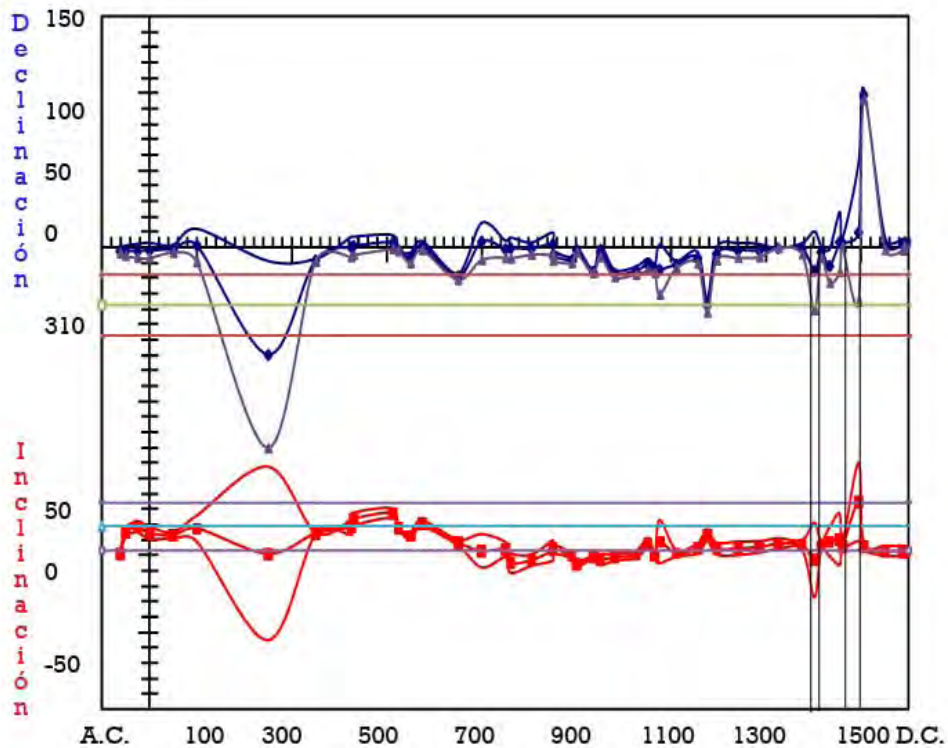
HT6		Muestra	Declinación	Inclinación	MAD
		HT6- A	305	49	NRM
		HT6- B	294.1	24.3	1.5
		HT6- C	324.8	27.6	3.2
		HT6- F	310.2	28.3	4.3
		HT6- K	353.1	41.9	3.8
		HT6- L	359.1	46.9	0.7
<p>HT6: $\overline{Dec} = 322.5$; $\overline{Inc} = 38.8$; $\alpha_{95} = 19.9$; $R = 5.594$; $K = 12.31$; $N = 6$ Fechas Probables: 1390- 1415 d. C., 1470- 1500 d. C.</p>					

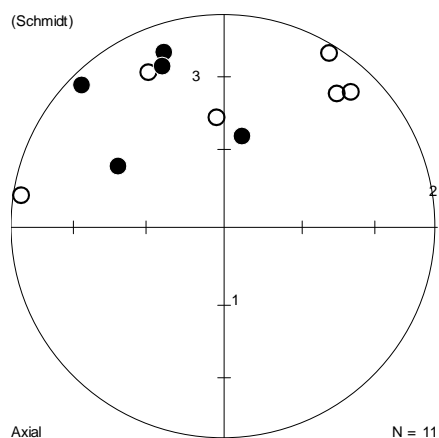
Tabla 5.18: Declinación e inclinación promedio de la muestra HT6.



Gráfica 5.11: Curva de variación secular con el fechamiento correspondiente a la muestra HT6.

Muestra HT7

Se midieron 12 especímenes en la muestra HT7, las mediciones NRM de cada espécimen y la red estereográfica de esta muestra aparecen a continuación.



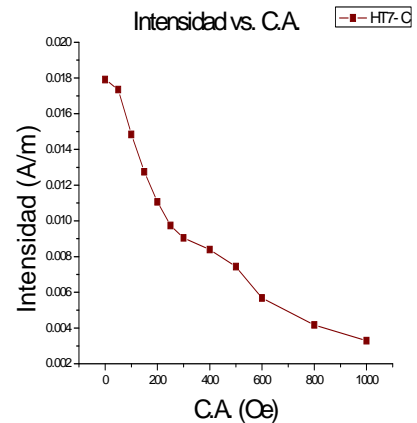
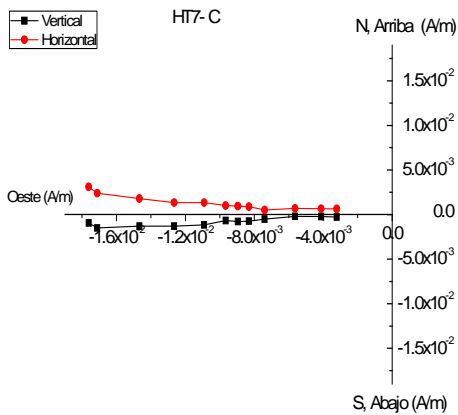
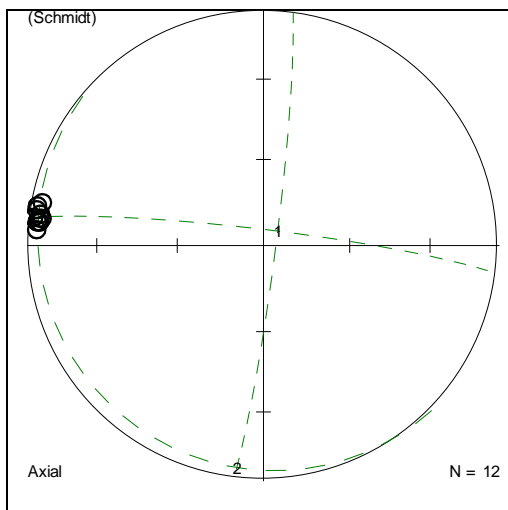
Gráfica 5.12: Red estereográfica de la medición NRM para la muestra HT7.

A continuación se muestra la declinación e inclinación de todos los especímenes de la muestra.

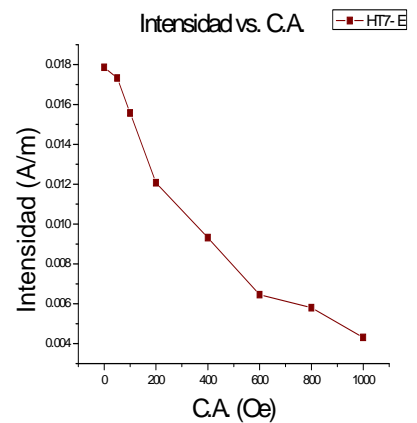
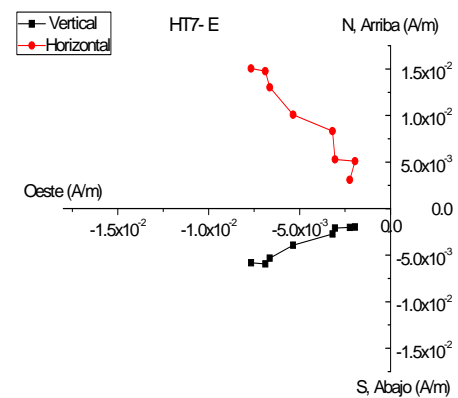
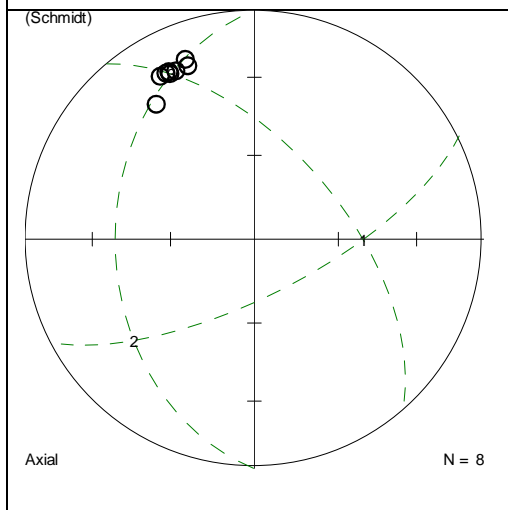
Muestra HT7-	Declinación	Inclinación	NRM	Desmagnetizada
A	No hay espécimen			
B	356	-47	X	
C	277.7	-4.4		X
D	43	-14	X	
E	333.7	-19.3		X
F	11	54	X	
G	301.7	40.5		X
H	40	-19	X	
I	313.9	5.3		X
J	339.8	11.8		X
K	340.5	19.1		X
L	31	-5	X	

Tabla 5.19: Mediciones de declinación e inclinación para cada espécimen de la muestra HT7.

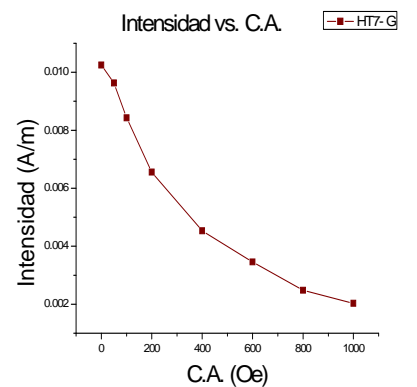
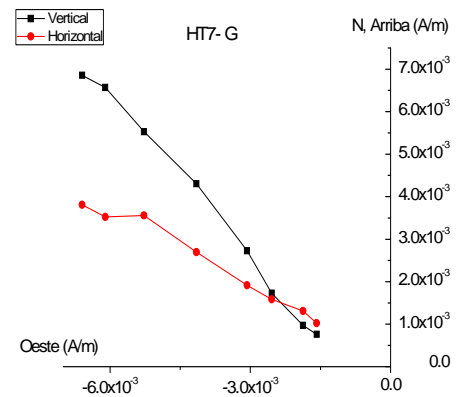
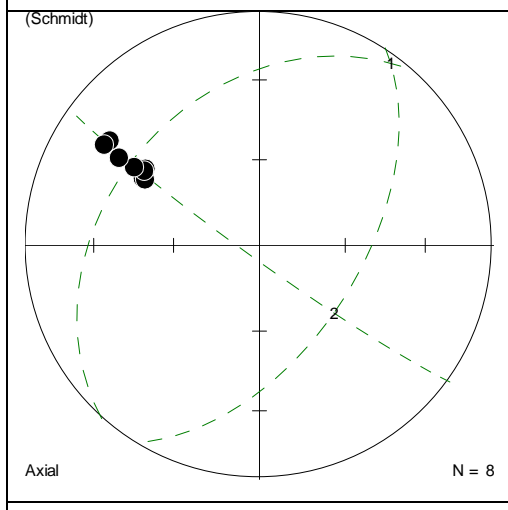
Los especímenes HT7- C, I fueron seleccionados como pilotos, y se seleccionaron los especímenes HT6- E, G, J, K para desmagnetizarlos en pasos cortos. A continuación se muestran los resultados del análisis por cada una de las muestras.



HT7-C: $\overline{Dec} = 277.7; \overline{Inc} = -4.4$



HT7-E: $\overline{Dec} = 333.7; \overline{Inc} = -19.3$



HT7-G: $\overline{Dec} = 301.7; \overline{Inc} = 40.5$

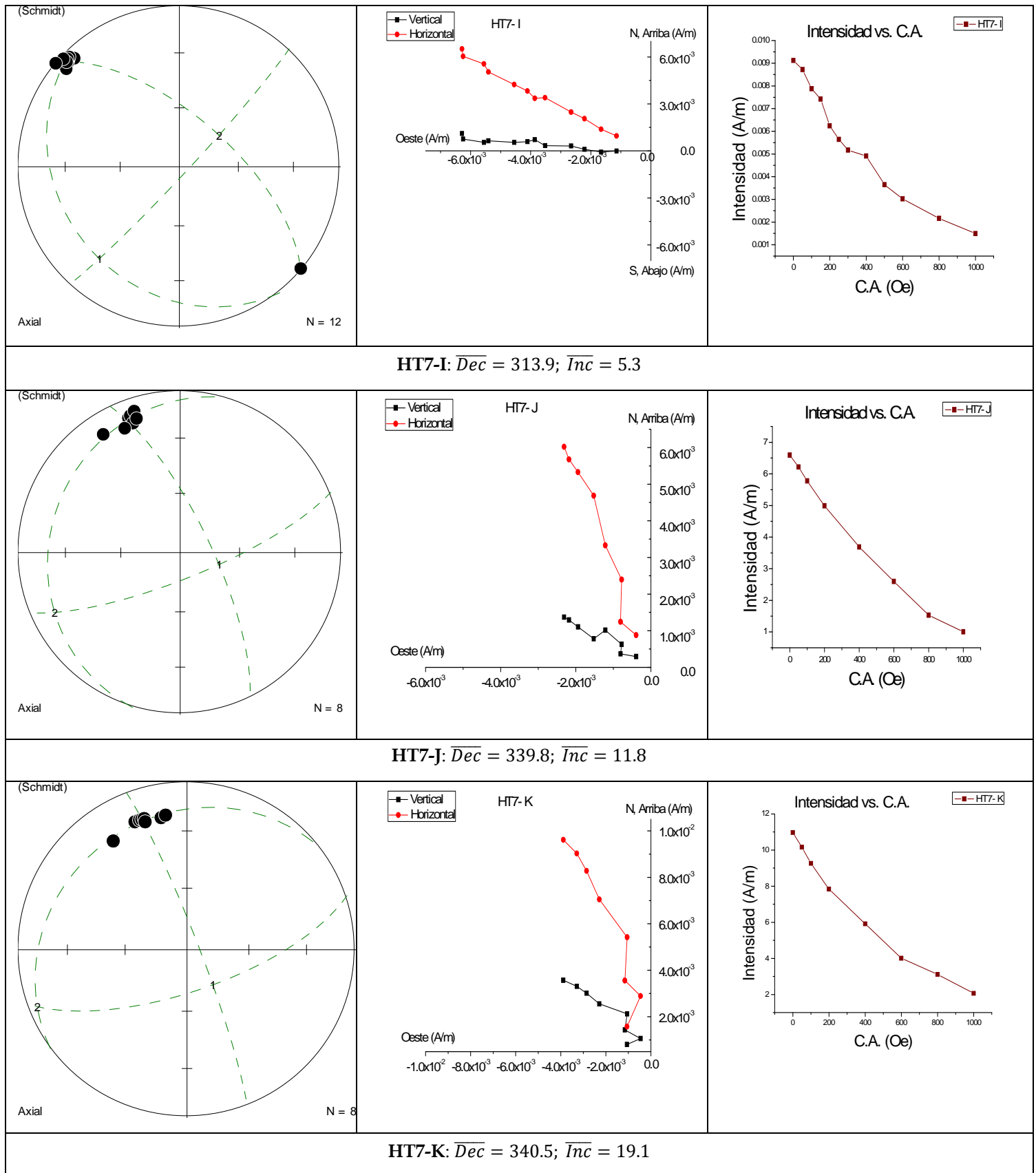


Tabla 5.20: Proyecciones estereográficas, diagramas de Zijderveld y gráfica de Intensidad VS. C.A. para los especímenes seleccionados en la muestra HT7.

En la tabla 5.20 podemos ver que los especímenes HT7- I, J, K presentan una dirección tendiente al origen y una inclinación y declinación muy parecida; no fue posible meter los

especímenes HT7- C, E por que presentan inclinaciones negativas, y la muestra HT6- G presenta una inclinación alta con respecto a los especímenes HT7- I, J, K.

Se seleccionaron los especímenes HT7- I, J, K para analizarlos en el programa FISH1.BAS y se obtuvo la declinación y la inclinación promedio de los especímenes y la red estereográfica promedio, la cual se muestra a continuación.

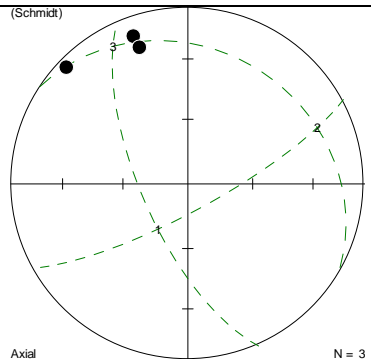
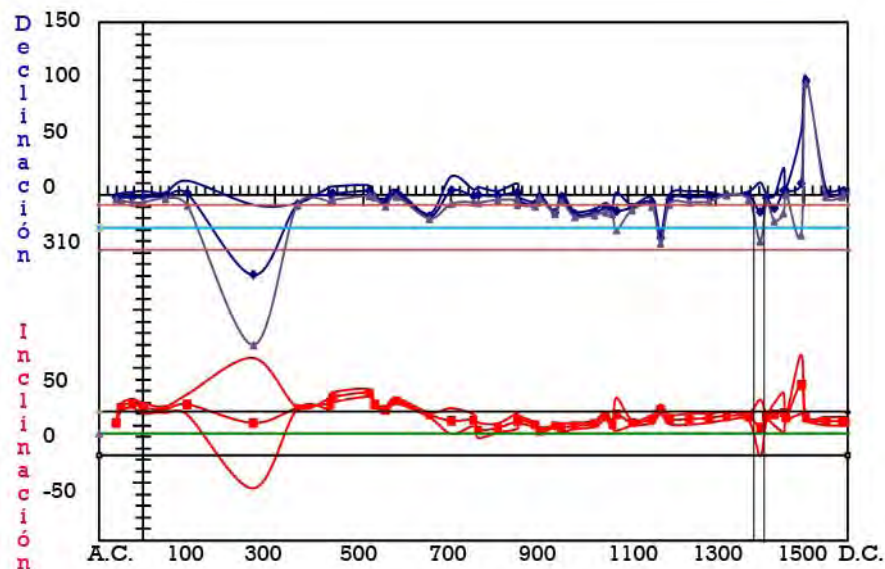
HT7		Muestra	Declinación	Inclinación	MAD
		HT7- I	313.9	5.3	2.0
		HT7- J	339.8	11.8	2.6
		HT7- K	340.5	19.1	3.4
HT7: $\overline{Dec} = 331.3$; $\overline{Inc} = 12.3$; $\alpha_{95} = 25.4$; $R = 2.919$; $K = 24.5$; $N = 3$ Fechas Probables: 1385- 1410 d. C.					

Tabla 5.21: Declinación e inclinación promedio de la muestra HT7.



Gráfica 5.13: Curva de variación secular con el fechamiento correspondiente a la muestra HT7.

Del análisis de datos anterior, se obtiene la tabla 5.21 la cual nos muestra la declinación e inclinación promedio y el año para el fechamiento de la muestra.

Muestra	Declinación Promedio	Inclinación Promedio	α_{95}	R	K	Fechas arqueomagnéticas probables	Fecha Aceptada	Fecha Arqueológica
HT1	349.4	62.1	10.96	3.957	71.1824	1470- 1500	1470- 1500	1500- 1600
HT2, dir. 1	322.5	9.1	4.9	2.997	632.8	1480- 1500	1480- 1500	1500-1600
HT2, dir 2	9.1	29.2	13.7	1.996	82.14	1490-1545	1490-1545	1500-1600
HT3	La muestra	presenta	mucha	dispersión				
HT4	6.9	35.7	15.5	4.842	25.30	1460- 1490, 1550- 1590	1460- 1490	1300- 1500
HT5	La muestra	Presenta	mucha	dispersión				
HT6	322.5	38.8	19.9	5.594	12.31	1390- 1415, 1470- 1500	1390- 1415	1300- 1500
HT7	331.3	12.3	25.4	2.919	24.5	1385- 1410	1385- 1410	1300- 1500

Tabla 5.21: Fechas arqueomagnéticas obtenidas. Donde α_{95} , R y K son parámetros estadísticos: α_{95} es el intervalo de confianza, R es la resultante y K es el parámetro de precisión.

Capítulo 6: Conclusiones

Podemos observar en la tabla 5.21 que 5 muestras de las 7 extraídas del sitio arqueológico nos dieron un fechamiento arqueomagnético aproximado al fechamiento arqueológico.

En la muestra HT1, la cual fue extraída del frente de excavación 1A se obtuvo una inclinación alta; en la muestra HT2 (también extraída del frente 1A) la inclinación es un poco más baja y se obtuvieron dos direcciones, estas dos direcciones tienen una coincidencia en los años 1490- 1500. El valor de a_{95} fue menor a 15° , por lo que se considera aceptable, esto se puede deber a que las muestras se extrajeron de dos hornos, a una profundidad de 0.30 m a 0.90 m lo que hizo que el registro tuviese una mayor coercitividad y que las muestras no estuvieran tan afectadas por factores externos, como la contaminación industrial del lugar. El hecho de que las muestras hayan estado quemadas conviene al aplicar este método, pues la muestra al momento de su última exposición al fuego, guarda la dirección e intensidad del campo magnético presente. Por lo que la fecha obtenida nos puede decir la última exposición al fuego de los hornos analizados.

Para la muestra HT3 y HT4, las cuales se extrajeron de un solo horno en el frente de excavación 5, en el pozo 1, la muestra HT4 se extrajo de la parte más profunda del horno, lo que ayudó a que ésta no presentara tanta contaminación ocasionada por el medio ambiente y los especímenes de la muestra presentaran una orientación no tan dispersa, pues se obtuvo un $a_{95} = 15.4^\circ$. Mientras que la muestra HT3 se extrajo de una parte más arriba del horno, como se vió en el capítulo anterior, no se pudieron obtener resultados, ya que los especímenes presentaban mucha dispersión, esto pudo haber sido a que el lugar de donde se extrajo la muestra no haya estado lo suficientemente quemado y por factores externos como la radiación la cual hace que se vayan perdiendo gradualmente la orientación de la dirección e intensidad del campo magnético presente en la última exposición al fuego del horno.

Las muestras HT5, HT6 y HT7 se extrajeron del frente de excavación 2 en el segundo nivel ocupacional, el cual tiene una profundidad de 2.00 m. a 0.90 m. Las muestras HT5 y HT6 fueron extraídas de dos hornos diferentes, pero como se puede observar en el capítulo anterior; la muestra HT5 presentó mucha dispersión, esto tal vez se deba a que los especímenes de la muestra fueron tomados de la parte externa del horno (Figura 3.14), lo que hizo que la muestra estuviera afectada por la contaminación del lugar, y no estuviera muy quemada como para guardar una sola orientación. En cuanto la muestra HT6, ésta fue tomada de la parte interna y externa del horno (Figura 3.17) por esta razón, puede que esta muestra haya presentado un poco de dispersión, pues se obtuvo un $a_{95} = 19.9^\circ$, pero la fecha arqueomagnética obtenida está dentro del fechamiento arqueológico. Finalmente, la muestra HT7 fue tomada del piso de ocupación de los hornos presentados en el frente de excavación 2, esta muestra también presentó dispersión, pues se obtuvo un $a_{95} = 25.4^\circ$, esto tal vez pudo deberse a que algunas partes del piso estaban muy quemadas y otras no, a la falta de especímenes y a la contaminación del lugar, pero en cuanto a la fecha arqueomagnética obtenida, ésta coincide con la fecha arqueológica reportada.

Se puede decir, que el método arqueomagnético funciona muy bien para superficies quemadas, como lo son los tlecuiles y los hornos prehispánicos, ya que el material guarda mejor la magnetización del momento de la última quema.

Las grandes dispersiones de los resultados se atribuyen posiblemente a la falta de especímenes, y a la contaminación del lugar, tal como es la radiación ocasionada por las fábricas cercanas a Héroes de Tecámac, Tecámac, Estado de México.

Bibliografía:

- Bauer, L. A., 1896. On the Secular motion of a free magnetic needle. *Phys. Rev.* 3, 34- 48
- Dodson, R. E., 1979. Counterclockwise precession of the geomagnetic field vector and westward drift of the non- dipole field, *J. Geophys. Res.* 84, 637- 44
- Eighmy, J. L., R. S. Sternberg, 1990., *Archaeomagnetic Dating*. The University of Arizona Press, Arizona, 5- 73.
- Fabiano, E. B., N. W. Peddie, 1983. A proposed International Geomagnetic Reference Field for 1965- 1985, *J. Geomag. Geoelectr.*, 34, 357- 364
- Fisher, R. A., 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society*, A.217, London, 295-305.
- García, R. E, 2005. De Tula a Azcapotzalco. Caracterización Arqueológica de los Altepetl de la Cuenca de México del Posclásico Temprano y Medio, a través del estudio cerámico regional. México D. F., 9- 13.
- García, R., L. M. Gamboa, N. V. Vélez, 2003. Informe final del salvamento arqueológico, realizado en la unidad de de Servicios Académicos Ecatepec, de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Santa Cruz, Ecatepec, Estado de México. Archivo Técnico del INAH.
- Gibson, C., 1967. Los Aztecas bajo el dominio español (1519- 1810). Siglo XXI, editores, México, 322- 345.
- McFadden, P. L., 1984. Statistical tools for the analysis of geomagnetic reversal sequences, *J. Geophys. Res.*, 89, 3363- 3372.
- Noguera, E., 1935. "La cerámica de Tenayuca y las excavaciones estratigráficas" en Tenayuca. Talleres Gráficos del Museo Nacional de Arqueología, Historia y Etnografía. México
- Noguera, E., 1943. "Excavaciones en El Tepalcate, Chimalhuacan, México" en *American Antiquity*. Vol. 9, no. 1, pp. 33- 43, Menasha, Icosin, E.U.A.
- Sanders, T. William, J. Parsons, R. Stanley, 1979. *Ecological Processes in the Evolution of a Civilization*. New York Academic Press.
- Soler, A. M., 2006. Investigaciones arqueomagnéticas en México. Fundamentos. Historia y futuro. México, D. F., 6- 39.
- Tauxe, L., 2005, Lectures in Paleomagnetism, <http://erda.sdsc.edu/website/MAGIC/books/Tauxe/2005/> U.S.A. Chap. 1- 5.
- Tolstoy, P., 1958. "Surface Survey of the Northern Valley of Mexico: The Classic and Postclassic Periods" en *American Philosophical Society, Transactions* . Vol. 48, Part 5. Philadelphia
- Vaillant, G. C., 1941. *La civilización Azteca*, E.U.A.
- Vaillant, G. C., 1944. *Aztecs of Mexico. Origin, Rise and fall of the Aztec Nation*. Garden City, Nueva York
- Vélez , N. V., 2009. Informe Final del proyecto de Salvamento Arqueológico, Héroes de Tecamac, Tecamac, Estado de México. Parte I. Resultados de la intervención arqueológica de los frentes de excavación 1- 6. México, D.F., pp. 339

Yukutake, T., H. Tachinaka, 1968. The westward drift of the geomagnetic secular variation, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **46**, 1075- 1102.