



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO DE NDACHJIAN TEHUACAN EN EL ESTADO
DE PUEBLA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:
MARÍA DEL CARMEN JOVANA OSORIO AGUILLÓN

TUTOR: DRA. ANA MARÍA SOLER ARECHALDE
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

CD. DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi Papá Goyo, quién siempre aplaudió mis triunfos y los hizo suyos.
Te extraño.

Y a mis padres.

Dedicatoria

A mis padres, espero que este pequeño paso en mi vida académica los haga sentir orgullosos de mí. Gracias por cuidarme, por guiarme y por ser mi más grande apoyo, con ustedes a mi lado todo fue más fácil.

A mi familia, en especial a los creen en mí y me lo hacen saber. Es el mejor elogio que me han podido dar.

A todos mis amigos, a aquéllos que han estado cuando más los he necesitado. Ustedes saben quiénes son. Gracias.

A mis dos amores. Jesús, eres toda mi vida y mi apoyo incondicional, gracias por ser un excelente esposo y padre. Cami y yo te amamos inmensamente.

A todos los que creyeron en mí.

"Hay una fuerza extremadamente poderosa para la que hasta ahora la ciencia no ha encontrado una explicación formal. Es una fuerza que incluye y gobierna a todas las otras, y que incluso está detrás de cualquier fenómeno que opera en el universo y aún no haya sido identificado por nosotros. Esta fuerza universal es el amor.

Cuando los científicos buscaban una teoría unificada del universo olvidaron la más invisible y poderosa de las fuerzas.

El amor es luz, dado que ilumina a quien lo da y lo recibe. El amor es gravedad, porque hace que unas personas se sientan atraídas por otras. El amor es potencia, porque multiplica lo mejor que tenemos, y permite que la humanidad no se extinga en su ciego egoísmo. El amor revela y desvela. Por amor se vive y se muere. El amor es Dios, y Dios es amor.

Esta fuerza lo explica todo y da sentido en mayúsculas a la vida. Ésta es la variable que hemos obviado durante demasiado tiempo, tal vez porque el amor nos da miedo, ya que es la única energía del universo que el ser humano no ha aprendido a manejar a su antojo.

Tras el fracaso de la humanidad en el uso y control de las otras fuerzas del universo, que se han vuelto contra nosotros, es urgente que nos alimentemos de otra clase de energía. Si queremos que nuestra especie sobreviva, si nos proponemos encontrar un sentido a la vida, si queremos salvar el mundo y cada ser sintiente que en él habita, el amor es la única y la última respuesta."

Albert Einstein (1879-1955).

Agradecimientos

A la Dra. Ana María Soler por la dirección y el apoyo durante la elaboración de esta Tesis, por la infinita paciencia, la confianza y los oportunos consejos. No hay suficientes palabras para expresar el agradecimiento que siento por arroparme cuando más lo necesité. Muchísimas gracias.

Al Dr. José Luis Ruvalcaba del Instituto de Física, gracias por la paciencia, el tiempo y el apoyo durante el Desarrollo Experimental y Análisis de Resultados, y de las oportunas correcciones de la presente Tesis. Muchas gracias.

A la M. en C. María Noemi Castillo del INAH, gracias por el apoyo durante las visitas a campo, por los sabios consejos y por siempre tener las puertas abiertas para cualquier inquietud. Gracias por el apoyo en la revisión de esta Tesis.

A la Dra. Laura Beramendi Orozco, gracias por los consejos y por el apoyo en la corrección de la presente Tesis.

A la Dr. Avto Goguichaishvili, gracias por los consejos y por el apoyo en la corrección de la presente Tesis.

Al Arqueólogo Alan Barrera, gracias por el apoyo brindado en el laboratorio de Paleomagnetismo, gracias por tu guía y tu compañía durante el desarrollo experimental de esta Tesis. Contigo todo fue más divertido.

Al Maestro en Ciencias de la Tierra, Arnaldo Hernández, gracias por los oportunos consejos y el apoyo durante el desarrollo experimental de esta Tesis.

Al Arqueólogo Omar García, gracias por el apoyo brindado durante las visitas a campo y las dudas que parecían interminables, muchas gracias.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra y al Instituto de Geofísica por permitirme dar un paso más en mi carrera académica.

Al Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural LANCIC sede Instituto de Física UNAM, a través de los proyectos CONACYT LN271614, y LN279740 por el uso del equipo de XRF Sandra.

Al CONACYT, por el apoyo económico durante estos casi dos años y medio.

Y por último, a mi segundo hogar. A la UNAM por abrirme sus puertas nuevamente y permitirme estudiar este posgrado.

| | Página |
|--|--------|
| Resumen | 1 |
| Introducción | 3 |
| Objetivos | 4 |
| Capítulo I. Bases Teóricas | |
| Teoría del Magnetismo | |
| I.1 Introducción | 5 |
| I.2 Propiedades Magnéticas de la Materia | 5 |
| I.2.1 Magnetización | 6 |
| I.2.2 Campo Magnético generado por un material magnetizado | 7 |
| I.2.3 Susceptibilidad y Permeabilidad Magnética | 10 |
| I.2.4 Histéresis | 11 |
| I.2.5 Ciclo de Histéresis y Magnetización Remanente Isotérmica (IRM) | 12 |
| I.2.6 Temperatura de Curie y Punto de Néel | 15 |
| I.3 Teoría Microscópica del Magnetismo | 15 |
| I.3.1 Materiales Diamagnéticos | 16 |
| I.3.2 Materiales Paramagnéticos | 17 |
| I.3.3 Materiales Ferromagnéticos | 17 |
| I.3.4 Dominios Magnéticos | 18 |
| I.3.5 Diagrama de Day | 20 |
| I.3.6 Caracterización de materiales según su momento magnético | 21 |
| I.3.7 Anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) | 21 |
| I.3.7.1 Tipos de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética | 24 |
| Análisis de Materiales | |
| I.3.8 Fluorescencia de Rayos X | 26 |
| | |
| Capítulo II. Campo Magnético Terrestre | |
| II.1 Geomagnetismo | 28 |
| II.2 El Campo Magnético Terrestre | 28 |
| II.3 Componentes vectoriales del Campo Magnético Terrestre | 31 |
| II.3.1 Polos Virtuales Geomagnéticos | 33 |
| II.4 Variación secular | 35 |
| II.5 Magnetismo de Rocas | 38 |
| II.5.1 Magnetización Remanente | 38 |
| | |
| Capítulo III. Contexto Arqueológico | |
| III.1 Introducción | 41 |
| III.2 Los Popolocas | 41 |
| III.3 Cronología | 46 |
| | |
| Capítulo IV. Bases Teóricas del Método Arqueomagnético | |
| IV.1 Introducción | 47 |
| IV.2 Magnetización en Estructuras Arqueológicas | 48 |
| IV.3 Medición de la Magnetización y Correcciones | 49 |
| IV.4 Representación de la Magnetización | 50 |
| IV.5 Desmagnetización | 51 |

| | |
|--|-----|
| IV.5.1 Desmagnetización por Campos Alternos | 51 |
| IV.6 Dirección Magnética principal | 52 |
| IV.6.1 Estadística de Fisher | 55 |
| IV.6.2 Estadística Bayesiana aplicada al Arqueomagnetismo | 57 |
| IV.7 Datación Arqueomagnética | 61 |
| IV.8 La Curva de Variación Secular y el Programa Ren-Date | 62 |
| IV.8.1 Modelos Globales de Variación Paleosecular | 64 |
| Capítulo V. Metodología Experimental | |
| V.1 Introducción | 66 |
| V.2 Toma de Muestras | 66 |
| V.3 Procesamiento de muestras Arqueomagnéticas | 72 |
| V.3.1 Preparación de especímenes | 72 |
| V.3.2 Medición de muestras Arqueomagnéticas | 74 |
| V.3.3 Determinación de la Dirección Magnética | 75 |
| V.4 Estudios Complementarios | 76 |
| V.4.1 Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS) | 76 |
| V.4.2 Ciclo de Histéresis y Magnetización Remanente Isotérmica (IRM) | 77 |
| V.4.2.1 Diagrama de Day | 78 |
| V.4.3 Espectroscopia por Fluorescencia de Rayos X (XRF) | 78 |
| Capítulo VI. Resultados | |
| VI.1 Determinación de la Dirección Magnética Principal | 80 |
| VI.2 Resultados de Estudios Complementarios | 104 |
| VI.2.1 Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS) | 104 |
| VI.2.2 Ciclo de Histéresis y Magnetización Remanente Isotérmica (IRM) | 110 |
| VI.2.2.1 Diagrama de Day | 114 |
| VI.2.4 Caracterización de Materiales por XRF | 115 |
| VI.3 Determinación de la Datación Arqueomagnética | 146 |
| VI.3.1 Comparación de la datación Arqueomagnética de Ndachjian Tehuacán con el Modelo de Variación Paleosecular ARCH3k | 159 |
| Conclusiones | 163 |
| Referencias Bibliográficas | 166 |
| Anexo A. Gráficas de desmagnetización, Diagramas de Zijderveld y Proyecciones estereográficas. | 171 |
| Anexo B. Resultados de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética. | 211 |

Resumen

Esta tesis presenta los resultados de la primera cronología no estilística para el sitio Ndachjian Tehuacán, Puebla, asiento de la cultura Popoloca, mediante el método de datación arqueomagnética.

Durante las campañas de julio de 2015 y diciembre de 2016 se extrajeron 13 muestras de estucos no quemados de pisos correspondientes a tres etapas constructivas diferentes. Las muestras se orientaron *in situ* antes de ser extraídas y transportadas al laboratorio. Los especímenes fueron procesados y caracterizados en el Laboratorio de Paleomagnetismo, sede Instituto de Geofísica en Ciudad Universitaria. Con el uso de un magnetómetro de giro AGICO JR6, un desmagnetizador de campos alterno MOLSPIN y el programa Remasoft 3.0 se obtuvo la magnetización característica de cada muestra. La Susceptibilidad Magnética y la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS) se midieron en un Susceptibilímetro Kappabridge KLY-2. Así mismo, los ciclos de Histéresis y de IRM fueron medidos en el MicroMag de Princeton Measurements. El análisis de materiales por Fluorescencia de Rayos X para obtener la concentración de los elementos de interés se realizó con el uso del equipo XRF SANDRA (Sistema de Análisis No Destructivo por Rayos X) del Instituto de Física de la UNAM (Ruvalcaba *et al.*, 2010).

La datación Arqueomagnética se efectuó con la Curva de Variación Secular para México, utilizando el programa REN-DATE. Las edades posibles se acotaron con la ayuda del arqueólogo responsable del sitio, para finalmente determinar las dataciones más probables de cada edificación.

En el Capítulo I y II se explican a detalle los fenómenos físicos necesarios para entender el Campo Magnético Terrestre partiendo de fundamentos básicos hasta la construcción de la teoría actual. Enseguida, en el Capítulo III se presenta un breve marco histórico del sitio de interés así como el período de asentamiento del pueblo Popoloca en Ndachjian Puebla. Teniendo bien establecidos los fundamentos teóricos necesarios para desarrollar el Método Arqueomagnético, en el Capítulo IV se profundiza en los detalles del método desde la adecuada extracción y recolección de muestras en campo, hasta el análisis para la obtención de la datación de cada una de las muestras. En el Capítulo V se

describe la metodología experimental, los estudios complementarios de magnetismo de rocas como Anisotropía de Susceptibilidad (AMS), Ciclo de Histéresis y Magnetización Remanente Isotérmica (IRM) para obtener el diagrama de Day, así como la caracterización de materiales por Fluorescencia de Rayos X (XRF), y la comparación de datación Arqueomagnética con el modelo ARCH3K. Finalmente, en el Capítulo VI se muestran los resultados obtenidos de todas las técnicas descritas en el Capítulo V.

Se concluye que las muestras de estuco no quemado de la zona de Tehuacán no presentan un buen registro del Campo Geomagnético debido a la abundancia de calizas en esta zona, por lo que se trabajó en el límite de resolución del magnetómetro. También se propone que en un futuro la cronología se podría enriquecer con dataciones mediante el método de radiocarbono y con muestras expuestas al fuego para estudios arqueomagnéticos con el objetivo de generar una cronología más robusta para el sitio.

Introducción

El Arqueomagnetismo es el estudio de materiales arqueológicos como pisos quemados (hornos, fogones, etc.) y pisos no quemados (estucos), que pueden registrar la variación del Campo Magnético Terrestre, así como caracterizar sus propiedades magnéticas.

El sitio arqueológico de estudio es Ndachjian Tehuacán y se localiza en una meseta al pie de una elevación conocida como Cerro Colorado, en el Municipio del mismo nombre del poblado de San Diego Chalma, a quince minutos de Tehuacán el nuevo. Su importancia en la historia prehispánica comienza en el período clásico, la zona arqueológica de Ndachjian Tehuacán fue asiento del pueblo Popoloca y su apogeo corresponde al post clásico desde el siglo XIII hasta el siglo XV cuando fueron sometidos por los mexicas quienes eran gobernados por Moctezuma Ilhuicamina.

A pesar de los esfuerzos por obtener una cronología del sitio, no se han localizado muestras orgánicas adecuadas para realizar dataciones con el uso del método de Carbono 14, por lo que el método Arqueomagnético es una opción factible para establecer una cronología confiable.

El método Arqueomagnético consistente en determinar la magnetización característica de las muestras arqueológicas para su comparación con patrones de variación secular, esto permite realizar cronologías en sitios donde no hay materiales para emplear dataciones mediante radiocarbono. El registro de la magnetización depende de varios factores como la viscosidad, el contenido de óxidos y el tamaño de grano, entre otros, los que son analizados mediante estudios de magnetismo de rocas como susceptibilidad magnética, anisotropía de susceptibilidad magnética, ciclos de histéresis y magnetización remanente isothermal.

El análisis de materiales por Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X (XRF) permite la determinación de la composición química (elementos mayores y traza), lo que ayuda a comprender el proceso de registro de la magnetización.

Por último, emplearemos modelos globales como el ARCH3K para corroborar la confiabilidad de los resultados propuestos.

Objetivos

General

- Mediante el empleo del Arqueomagnetismo determinar si los estucos de la zona de Ndachjian Puebla son adecuados para ser empleados como materiales de datación, con el fin de construir una cronología complementaria y más detallada que con la que ya se contaba.

Específicos

- Determinar si los estucos no quemados de la zona presentan un registro del Campo Geomagnético que permita su utilización para datación.
- Realizar estudios de espectroscopia (Fluorescencia de Rayos X) como un complemento a los estudios arqueomagnéticos para determinar su factibilidad para datación Arqueomagnética.
- Aportar una cronología más detallada del sitio ya que únicamente cuenta con un dato de radiocarbono, control estratigráfico y estudio cerámico.

Capítulo I.

Bases Teóricas

Teoría del Magnetismo

I.1 Introducción

El objetivo principal del Paleomagnetismo es obtener un registro del Campo Magnético Terrestre, entonces para comprender las variaciones de éste es necesario elegir el fenómeno físico adecuado que lo describa de forma aproximada. En este capítulo me limitaré a desarrollar la teoría para determinar el campo de inducción magnética debida a una distribución de corrientes, primero visto desde un punto de vista macroscópico y luego desde una formulación microscópica.

I.2 Propiedades Magnéticas de la Materia

La materia está constituida de átomos, es decir, de protones, neutrones y electrones. Estas partículas se encuentran en movimiento generando corrientes atómicas de dos tipos:

- i) Una corriente normal (transporte de carga), la cuál es un desplazamiento de carga positiva (protones) o negativa (electrones).
- ii) Una corriente atómica, es una corriente pura sin transporte de carga.

I.2.1 Magnetización

Supongamos un átomo aislado y los electrones que circulan alrededor del núcleo generan una corriente atómica. Además, recordemos que una corriente puede producir un campo magnético y sí el observador se encuentra lo suficientemente lejos, entonces el campo magnético producido puede describirse como un dipolo magnético.

Sea m_i es el momento magnético del i -ésimo átomo, entonces sumando vectorialmente todos los momentos dipolares de los átomos contenidos en un elemento de volumen Δv . Se define el momento dipolar magnético por unidad de volumen como:

$$M = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_i m_i \quad \dots (I.1)$$

Comúnmente conocida como magnetización.

Cuando la suma de los momentos dipolares es cero entonces se dice que el material está desmagnetizado dado que la orientación de todos los momentos dipolares m_i es aleatoria, sin embargo, en presencia de un campo magnético B la magnetización dependerá de dicho campo. Macroscópicamente hablando, todos los efectos magnéticos pueden describirse adecuadamente en función de M o sus derivadas.

La densidad de corriente de magnetización J_m es la densidad de corriente de transporte equivalente que generaría el mismo campo magnético que la propia M , y se describe matemáticamente por el rotacional de M .

$$J_m = \nabla \times M \quad \dots (I.2)$$

I.2.2 Campo magnético generado por un material magnetizado

El momento magnético de un material magnetizado en un elemento de volumen dado $\Delta v'$ está definido por:

$$\Delta m = M(x', y', z') \Delta v' \quad \dots (I.3)$$

El campo magnético se calcula integrando sobre todo el volumen v_0 del material. Sin embargo, notemos que es más conveniente utilizar el potencial V_m , entonces tenemos:

$$V_m(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \frac{M(x', y', z') \times (r - r')}{|r - r'|^3} dv' \quad \dots (I.4)$$

$$V_m(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} M(x', y', z') \times \nabla' \frac{1}{|r - r'|} dv' \quad \dots (I.5)$$

Utilizando las identidades (1) y (2)

$$\nabla \times (\varphi F) = (\nabla \varphi) \times F + \varphi \nabla \times F \quad \dots (1)$$

$$\int_V \nabla \times F dV = \oint_S n \times F da \quad \dots (2)$$

La integral de la ecuación (I.5) se transforma en:

$$V_m(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \frac{\nabla' \times M}{|r - r'|} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S_0} \frac{M \times n}{|r - r'|} da' \quad \dots (I.6)$$

Donde S_0 es la superficie del volumen v_0 .

Definiendo j_M como la densidad de corriente de magnetización superficial como:

$$j_M = M \times n \quad \dots (I.7)$$

Se obtiene:

$$V_m(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \frac{J_M(r')}{|r-r'|} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \frac{j_M(r')}{|r-r'|} da' \quad \dots (I.8)$$

Para calcular el campo magnético $B(r)$ basta calcular el rotacional del potencial $V_m(r)$, como se muestra:

$$B(r) = \nabla \times V_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \nabla \times \left[M \times \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] dv' \quad \dots (I.9)$$

Se debe notar que los operadores diferenciales actúan sobre las coordenadas sin prima. El integrando de la ecuación anterior se transformará usando la identidad (3).

$$\nabla \times (F \times G) = (\nabla \cdot G)F - (\nabla \cdot F)G + (G \cdot \nabla)F - (F \cdot \nabla)G \quad \dots (3)$$

Haciendo $F = M(r')$ y $G = (r-r')/|r-r'|^3$ y notando que los operadores solo actúan sobre las coordenadas sin primas, se obtiene:

$$\nabla \times \left[M \times \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] = M \nabla \cdot \left[\frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] - (M \cdot \nabla) \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \quad \dots (I.10)$$

Entonces la integral (I.9) se transforma en:

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} M \nabla \cdot \left[\frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] dv' - \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} (M \cdot \nabla) \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} dv' \quad \dots (I.11)$$

A la primera y la segunda integral nombrémosla $B_1(r)$ y $B_2(r)$, correspondientemente.

La primer integral se resuelve fácilmente con la ecuación (4)

$$\nabla \cdot \frac{\vec{r}}{r^3} = 4\pi\delta(\vec{r}) \quad \dots (4)$$

entonces:

$$B_1(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} M(r') 4\pi \delta(r - r') dv' = \mu_0 M(r) \quad \dots (I.12)$$

Para resolver la segunda integral, primero se transforma el integrando con la identidad (5)

$$\nabla(F \times G) = (F \cdot \nabla)G + F \times (\nabla \times G) + (G \cdot \nabla)F + G \times (\nabla \times F) \quad \dots (5)$$

y se obtiene:

$$\begin{aligned} \nabla \left[M \cdot \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} \right] &= (M \cdot \nabla) \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} + M \times \nabla \times \left[\frac{(r - r')}{|r - r'|^3} \right] \\ \Leftrightarrow (M \cdot \nabla) \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} &= \nabla \left[M \cdot \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} \right] - M \times \nabla \times \left[\frac{(r - r')}{|r - r'|^3} \right] \quad \dots (I.13) \end{aligned}$$

Notemos que el segundo término de la ecuación (I.13) se puede transformar en:

$$\nabla \times \left[\frac{(r - r')}{|r - r'|^3} \right] = -\nabla \times \nabla \frac{1}{|r - r'|}$$

El cuál se anula y la integral es cero, entonces la segunda integral se reduce a:

$$B_2(r) = -\mu_0 \nabla \frac{1}{4\pi} \int_{v_0} M(r') \cdot \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} dv' \quad \dots (I.14)$$

Renombrando:

$$B_2(r) = -\mu_0 \nabla \varphi(r) \quad \dots (I.15)$$

Donde $\varphi(r)$ es un campo escalar debido al material magnético y está definido por:

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi} \int_{v_0} M(r') \cdot \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} dv' \quad \dots (I.16)$$

Finalmente, se obtiene el campo de inducción magnética:

$$B(r) = -\mu_0 \nabla \varphi(r) + -\mu_0 M(r) \quad \dots (I.17)$$

La inducción magnética causada por un material magnetizado puede expresarse como la suma de dos términos: el gradiente de un campo escalar y un término proporcional a la magnetización local.

I.2.3 Susceptibilidad y Permeabilidad Magnética

En magnetismo, es primordial conocer la relación entre la magnetización M y el vector auxiliar H . Esta relación depende del tipo de material magnético, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$M = \chi_m H \quad \dots (I.18)$$

Donde H es el vector de *intensidad magnética* y χ_m es una cantidad escalar conocida como *susceptibilidad magnética*. Nótese que la ecuación es válida sí el material es isótropo y lineal, este parámetro cuantifica la capacidad de dicho material al paso de flujo magnético.

Otra relación primordial importante entre el campo magnético B y el vector auxiliar H está dada por:

$$B = \mu H \quad \dots (I.19)$$

Donde μ es la permeabilidad y se puede expresar en función de la susceptibilidad:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) \quad \dots (I.20)$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío. Los materiales magnéticos se clasifican en función de la susceptibilidad y la permeabilidad como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla I.1 Muestra la clasificación de susceptibilidad y permeabilidad de un material ante un campo magnético (modificado de Soler-Arechalde, 2006). Donde μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío, definido como $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$.

| Nombre | Susceptibilidad | Permeabilidad |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------|
| Paramagnético | $0 < \chi \ll 1$ | $\mu > \mu_0$ |
| Diamagnético | $\chi < 0$ y $ \chi \ll 1$ | $\mu < \mu_0$ |
| Ferromagnético | $\chi \gg 1$ | $\mu \gg \mu_0$ |

I.2.4 Histéresis

En particular, los materiales ferromagnéticos se caracterizan por su capacidad de magnetizarse permanentemente, sin embargo, estos materiales no tienen un comportamiento lineal como los paramagnéticos y diamagnéticos. Por lo cual, la forma común de caracterizarlos es describir la relación entre el M y H , obteniendo la curva de magnetización del material como se muestra la siguiente figura.

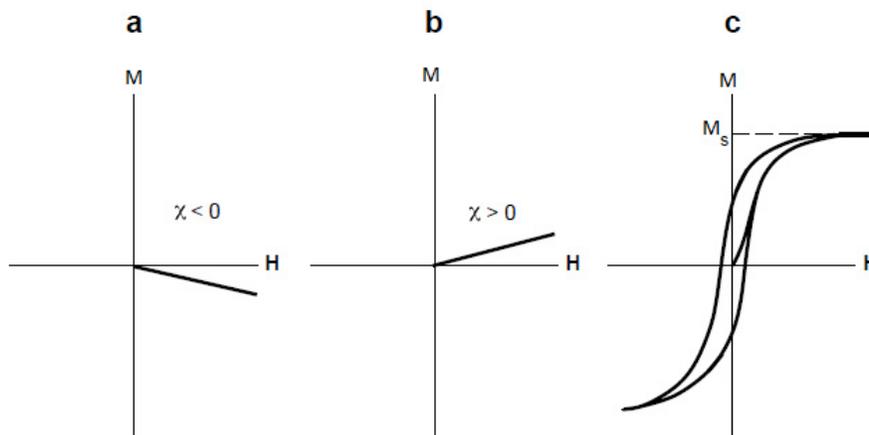


Figura I.1 Muestra la relación de Magnetización M contra Intensidad de Campo H para a) diamagnético, b) paramagnético y c) ferromagnético. Donde M_s es magnetización de saturación (modificado de Butler, 1992).

La curva c) de la Figura I.1 se llama curva característica de *histéresis* de un material ferromagnético.

I.2.5 Ciclo de Histéresis y Magnetización Remanente Isotérmica (IRM)

Un material ferromagnético bajo un campo magnético se alinea con dicho campo y al retirar el campo su magnetización no se anula por completo, es decir, presenta una magnetización residual.

Esto se observa cuando se grafica la magnetización M de un material ferromagnético en función del campo magnético aplicado H , se observa un retardo en el efecto del campo sobre el material y así se obtienen curvas diferentes cuando se aumenta y se disminuye H . A este fenómeno se le conoce como Histéresis.

El ciclo de histéresis sirve como herramienta para determinar las características de magnetización en los materiales ferromagnéticos, y a partir de las curvas del ciclo se puede determinar el tipo de dominio magnético de dicho material.

En la Figura I.2 se muestra un a) ciclo de Histéresis para una muestra sintética compuesta de partículas de magnetita con dominio simple dispersas en un 5% del volumen total. En el punto 1 (b) los granos de magnetita se comienzan a alinear con el campo inducido H , donde las flechas sobre los granos indican la dirección de magnetización de cada grano. En el punto 2 (c) la magnetización ha alcanzado la magnetización de Saturación M_s , y las flechas sobre los granos están alineados con el campo H . En el punto 3 (d) se ha eliminado el campo inducido H y la magnetización es distinta de cero e igual a la magnetización remanente M_r . En el punto 4 (e) el campo inducido aumenta en dirección negativa hasta obtener una magnetización igual a cero y la magnetización de cada grano se comienza a alinear con la nueva dirección del campo.

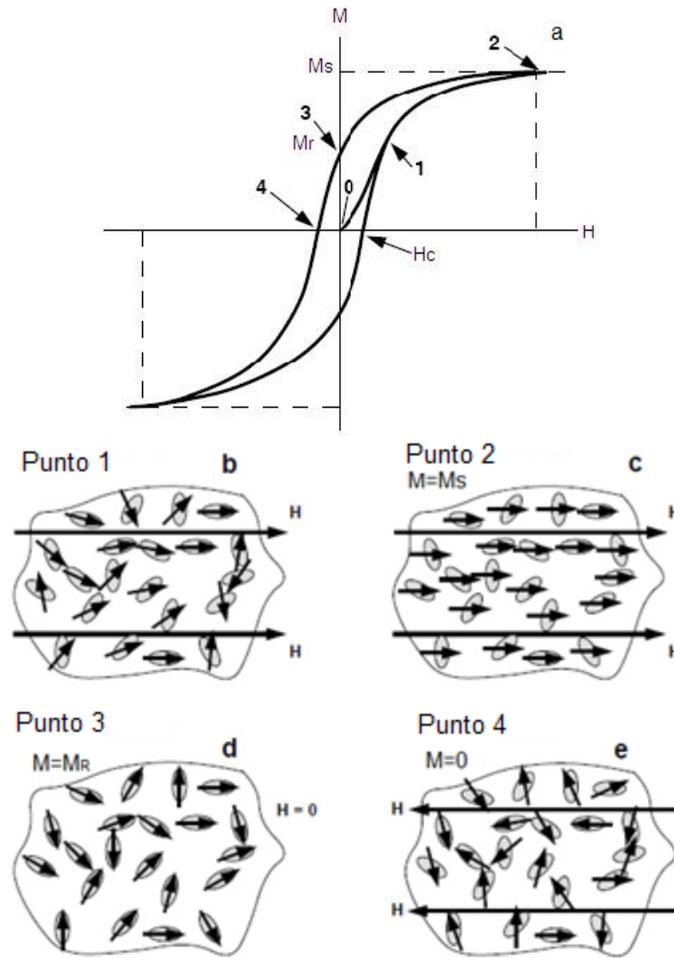


Figura 1.2 Se exhibe el a) ciclo de Histéresis para una muestra sintética que contiene partículas con Dominio Sencillo de magnetita dispersadas en 5% del volumen total. Donde H_C es la coercitividad (el campo requerido para mover las paredes del dominio y poder obtener la magnetización M), M_S es la magnetización de saturación producida por el intercambio de espines atómicos, M_R es la magnetización remanente y H el campo magnético de exposición (modificado de Butler, 1992).

A continuación se muestran las gráficas de los ciclos de Histéresis para diversos materiales.

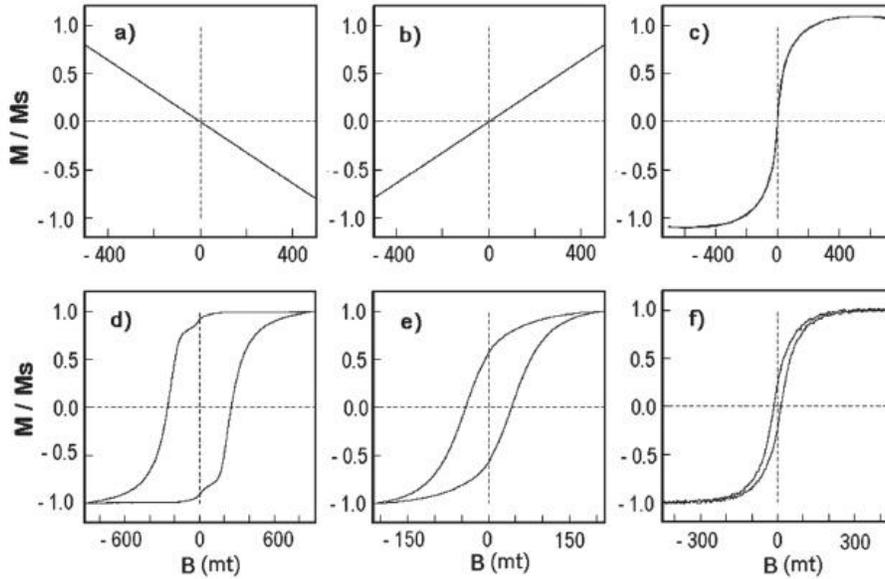


Figura I.3 Gráficas de ciclos de histéresis de diversos materiales: a) diamagnético, b) paramagnético, c) supermagnético, d) antiferromagnético imperfecto (hematites), e) ferrimagnético: magnetita de dominio sencillo, f) pseudo dominio sencillo (PSD) (Tauxe, 2007).

La Magnetización Remanente Isotérmica (IRM) consiste en aplicar un campo magnético directo H , dicho campo crece desde unos pocos mT (~ 4 mT) de forma lenta hasta valores altos (~ 2.5 T) a temperatura constante. Este proceso magnetizará secuencialmente los granos más blandos (ferrimagnéticos), los de rango medio y los más duros (antiferromagnéticos).

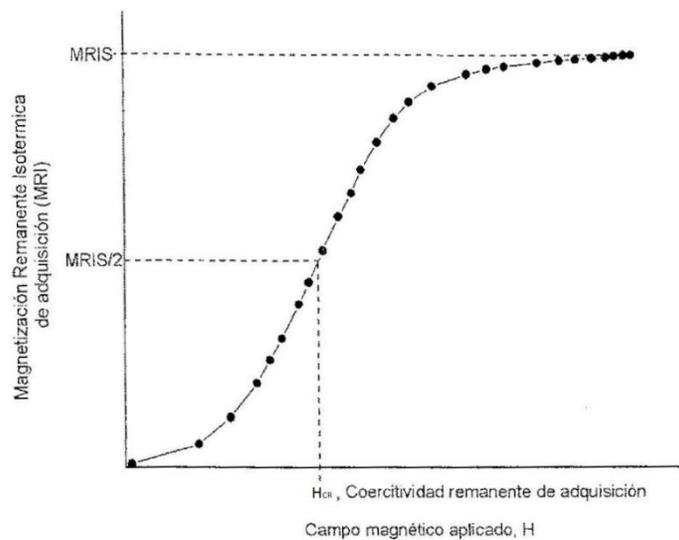


Figura I.4 Gráficas de IRM donde se presentan los dos parámetros de interés, IRM de saturación ($MRIS$) y la coercitividad de remanencia de adquisición (H_{CR}) (Chaparro, 2006).

I.2.6 Temperatura de Curie y Punto de Néel

La magnetización de saturación M_s , la temperatura de Curie T_C y el punto de Néel T_N solo dependen de la composición química del material, a diferencia de la susceptibilidad magnética y el ciclo de histéresis que también dependen de la geometría de los granos y de la interacción entre ellos.

La temperatura de Curie T_C es la temperatura en la cual un material ferromagnético pierde sus propiedades magnéticas y se comporta como un material paramagnético, en la mayoría de las rocas la temperatura de Curie es menor a los 600°C. El punto de Néel T_N es el análogo de la temperatura de Curie T_C en materiales antiferromagnéticos.

I.3 Teoría Microscópica del Magnetismo

El campo magnético a nivel microscópico se denomina campo molecular y se define como:

$$B_m = \mu_0 H_m \quad \dots (I.21)$$

Este campo es generado por todas las fuentes externas y por todos los dipolos atómicos o moleculares, excepto en la partícula desde donde se considera dicho campo.

Consideremos un objeto de forma arbitraria con una magnetización arbitraria M , entonces el campo molecular puede expresarse por la ecuación (I.22).

$$H_m = H + H_s + H' \quad \dots (I.22)$$

Donde H es la intensidad magnética macroscópica, H_s es la contribución de la densidad de polos superficial y H' es la contribución de los polos al interior del objeto. Expresadas matemáticamente por las siguientes ecuaciones:

$$H = \frac{1}{4\pi} \int \frac{J \times (r - r')}{|r - r'|^3} dv' + \frac{1}{4\pi} \int \rho_M \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} dv' + \frac{1}{4\pi} \int_S \sigma_M \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} da' \quad \dots (I.23)$$

$$H_s = \frac{1}{3} M \quad \dots (I.24)$$

$$H' = \frac{1}{4\pi} \sum_i \left[\frac{3(m_i \cdot r_i)r_i}{r_i^5} - \frac{m_i}{r_i^3} \right] \quad \dots (I.25)$$

Donde r_i es la distancia de i -ésimo polo al centro. Sí se limita al estudio de materiales donde H' se anula, la ecuación (I.22) se reduce a:

$$H_m = H + \frac{1}{3} M \quad \dots (I.26)$$

El término H_s es pequeño para la mayoría de los materiales diamagnéticos y paramagnéticos, sin embargo, para materiales ferromagnéticos la corrección es importante.

I.3.1 Materiales Diamagnéticos

El diamagnetismo es el resultado de la Ley de Lenz a escala atómica, es decir, en un campo magnético las corrientes electrónicas de cada átomo se modifican para debilitar el efecto de dicho campo.

La magnetización en un material con N partículas por unidad de volumen es:

$$M = -\frac{Ne^2\mu_0}{4m_e} \sum_i R_i^2 \cdot \cos^2\theta_i \quad \dots (I.27)$$

Donde θ_i es el ángulo entre el campo inducido y R_i es la órbita del electrón.

El diamagnetismo se puede observar claramente en materiales donde las capas electrónicas están completas, ya que el paramagnetismo no tiene contribución bajo estas condiciones.

I.3.2 Materiales Paramagnéticos

El electrón tiene una propiedad intrínseca denominada *espín*, y por tanto, un momento magnético asociado a la carga de dicho *espín*. Entonces, el paramagnetismo es el resultado de la alineación de estos momentos magnéticos al aplicarse un campo externo.

Nuevamente, consideremos un material constituido de átomos iguales con momento magnético m_0 , de forma aproximada la magnetización está dada por:

$$M = \frac{Nm_0^2}{3kT} \mu_0 H_m \quad \dots (I.28)$$

Donde N es el número de moléculas por unidad de volumen, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura en Kelvin. Entonces la susceptibilidad magnética es:

$$\chi_m = \frac{Nm_0^2 \mu_0}{3kT} \quad \dots (I.29)$$

En general, un material paramagnético tiene momentos magnéticos permanentes por lo que la magnetización es significativamente mayor cuando se le aplica un campo externo.

I.3.3 Materiales Ferromagnéticos

En los materiales Ferromagnéticos, los momentos magnéticos están alineados aún sin la presencia de un campo magnético externo. El campo molecular está dado por $H_m = H + \gamma M$, pero sí consideramos un campo externo nulo $H = 0$, entonces tenemos:

$$H_m = \gamma M \quad \dots (I.30)$$

Además, la orientación fraccionada para un material de un solo tipo de molécula está dada por la función de Langevin:

$$y = \frac{m_0 \mu_0 H_m}{kT} \quad \dots (I.31)$$

Como los momentos magnéticos atómicos están casi alineados entonces M debe ser una fracción grande de Nm_0 , por lo que podemos suponer que:

$$M > 0.7 Nm_0 \quad \dots (I.32)$$

Dada la condición de la ecuación (I.32), la orientación fraccionada se acota, es decir:

$$\frac{m_0 \mu_0 H_m}{kT} > 3 \quad \dots (I.33)$$

Sustituyendo la ecuación (I.30) en la ecuación (I.33), se tiene:

$$\gamma \frac{m_0 \mu_0 M}{kT} > 3 \quad \dots (I.34)$$

Luego sustituyendo la ecuación (I.32) en la ecuación (I.34) y despejando γ (M se define positiva). Se obtiene:

$$\gamma > 2.1 \frac{N \mu_0 m_0^2}{kT} \quad \dots (I.35)$$

Por lo tanto, para que un material sea clasificado como ferromagnético el valor de la permeabilidad está condicionado por la ecuación (I.35) de forma aproximada.

I.3.4 Dominios Magnéticos

Un material ferromagnético está constituido de pequeñas regiones, a éstas se les denomina *dominios magnéticos*. En cada dominio hay una dirección preferencial

dada por la suma de los momentos magnéticos de los espines, como se muestra en la Figura I.5.

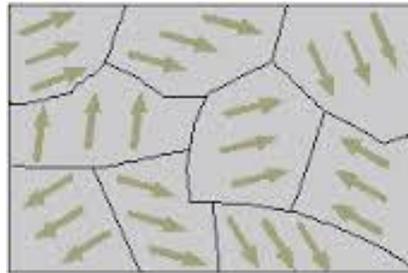


Figura I.5 Muestra los dominios magnéticos dentro de un material ferromagnético (modificado de Butler, 1992).

El vector de momento magnético atómico cambia de dirección al pasar de un dominio a otro como se muestra en la Figura I.6, a esta variación se le conoce como *pared de dominio* o de *Bloch*.

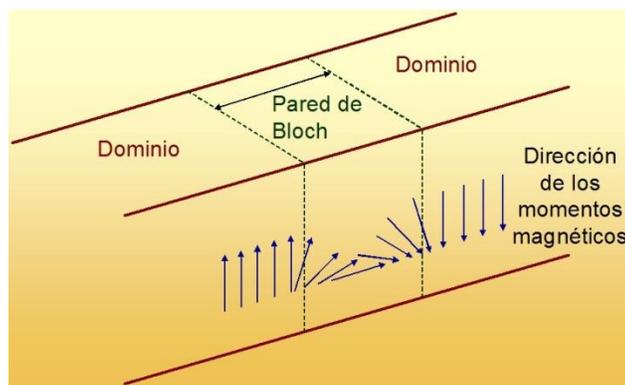


Figura I.6 Muestra la estructura de transición o pared de Bloch entre dominios (modificado de Tarling, 1983).

El número de dominios dentro de un material disminuye sí el tamaño de las partículas también disminuye. En un material ferromagnético se pueden encontrar tres clases de dominios, un *Dominio Simple* (DS) el cual contiene un solo dominio y la magnetización es debida a la rotación simultánea de los espines dentro del material; un *Dominio Múltiple* (MD) el cual contiene más de un dominio y la magnetización es debida al movimiento de las paredes, por la formación o deformación de los dominios en el material; o finalmente, un *Dominio Pseudo-Sencillo* (DPS) donde la magnetización no es uniforme ya que el tamaño de las partículas es mayor. (Dunlop, 1995),

El tipo de dominio magnético se puede determinar a partir del ciclo de Histéresis e IRM, de los cuáles se extraen los parámetros de magnetización de saturación (M_S), saturación de remanencia (M_{RS}), coercitividad (H_C) y coercitividad de remanencia (H_{CR}). Los ciclos de Histéresis y de IRM fueron medido en el MicroMag de Princeton Measurements, este instrumento hace oscilar mecánicamente una pequeña cantidad de material (~50mg) por medio de un electroimán que induce un momento magnético extra al de la muestra. Esta oscilación es proporcional al momento magnético inicial de la muestra y es medida por un cristal piezoeléctrico el cual transforma el movimiento en una diferencia de potencial.

I.3.5 Diagrama de Day

Finalmente, obtenidos los parámetros de magnetización de saturación (M_S), saturación de remanencia (M_{RS}) y coercitividad (H_C) del ciclo de Histéresis y el parámetro de coercitividad de remanencia (H_{CR}) de la IRM, se puede obtener el diagrama de Day (Day et al., 1977) en función de los cocientes de M_{RS}/M_S y H_{CR}/H_C como se muestra en la Figura I.6.

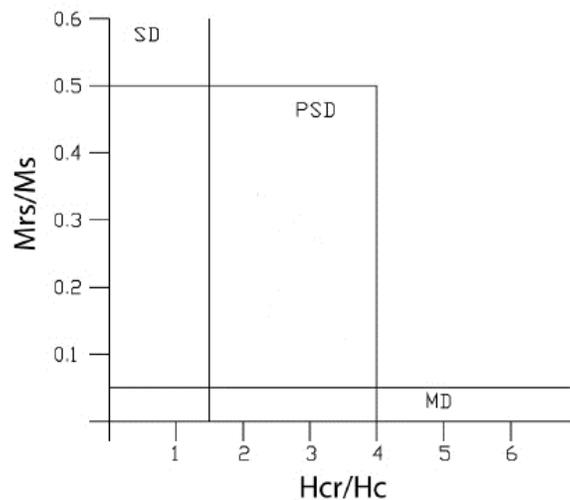


Figura I.6 Muestra el diagrama de Day (Day et al., 1977) Donde SD es dominio sencillo, PSD es dominio pseudo sencillo y MD es dominio múltiple.

I.3.6 Caracterización de materiales según su momento magnético

La teoría del ferromagnetismo de Heisenberg afirma que un cambio en la energía electrostática está relacionado con el cambio en la alineación del espín de forma paralela o antiparalela. Cuando la alineación de los espines se realiza de forma paralela tenemos un material ferromagnético, y cuando la alineación de los espines es de forma antiparalela el material se denominará antiferromagnético. También existe una estructura más compleja, la cual contiene espines paralelos y antiparalelos pero el momento magnético total es distinto de cero por cual presenta una magnetización de saturación M_s , este material se nombra ferrimagnético.

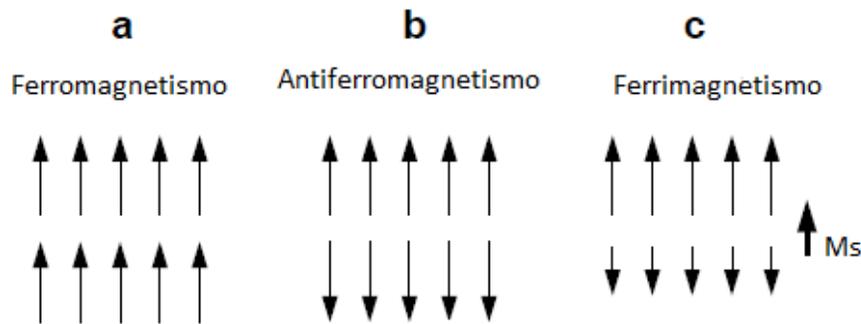


Figura I.7 Muestra el acoplamiento de los momentos dipolares m , asociados a espines electrónicos, en función a la respuesta del material; por ejemplo un material a) ferromagnético, b) antiferromagnético y c) ferrimagnético (modificado de Butler, 1992).

I.3.7 Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS)

Como se ha mencionado en el Capítulo II, la Magnetización Remanente depende directamente del tipo de grano (tipo de mineral magnético) y del tamaño (tipo de dominio magnético), además del *tiempo de relajación de la magnetización*.

Cuando un grano es magnetizado, la dirección del campo es guardada en el material durante un período de tiempo específico, y a esto se le conoce como *tiempo de relajación*. A medida que el material se enfría por debajo de la temperatura de Curie, el tiempo de relajación aumenta de manera exponencial

hasta llegar a la temperatura de bloqueo. El tiempo de relajación de un grano magnético es dependiente de la temperatura y del volumen.

La magnetización M y la susceptibilidad magnética k (volumétrica) son propiedades anisotrópicas y se relacionan por el tensor:

$$M_i = k_{ij} \cdot H_j \quad \text{con } i = 1,2,3 \text{ y } j = 1,2,3 \quad \dots (I.36)$$

De forma matricial:

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{pmatrix} \quad \dots (I.37)$$

La matriz de susceptibilidad es una matriz de segundo orden, donde los términos cruzados son iguales, es decir, $k_{12} = k_{21}$, $k_{13} = k_{31}$ y $k_{23} = k_{32}$.

Dicha matriz se puede diagonalizar calculando los autovalores y autovectores, y así obtener los valores característicos k_1 , k_2 y k_3 , que son las susceptibilidades principales: máxima, intermedia y mínima correspondientemente.

$$k_{ij} = \begin{vmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_{max} & 0 & 0 \\ 0 & k_{int} & 0 \\ 0 & 0 & k_{min} \end{vmatrix} \quad \dots (I.38)$$

El tensor de anisotropía magnética se puede representar por un elipsoide como se muestra en la siguiente figura.

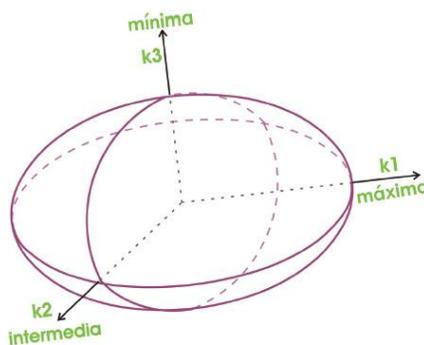


Figura I.8 Muestra el elipsoide de susceptibilidad dado por el tensor de susceptibilidad magnética en coordenadas cartesianas. (Caballero-Miranda, 2011).

Las direcciones principales se representan en diagramas circulares de proyecciones ecuatoriales sobre el hemisferio inferior con cuadros, triángulos y círculos que representan los ejes principales k_1 , k_2 y k_3 , respectivamente (Caballero Miranda, 2011), como se muestra en la Figura I.9.

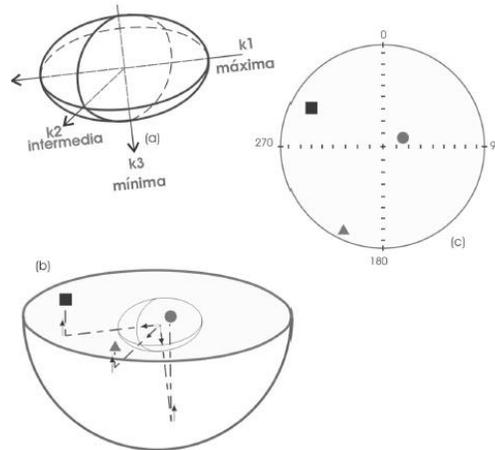


Figura I.9 Muestra la proyección ecuatorial del elipsoide de anisotropía de susceptibilidad magnética en proyecciones de igual área. a) Elipsoide de anisotropía de susceptibilidad magnética, b) Proyección Smith y c) Proyección Wulff. (Tomado de Caballero Miranda, 2011).

Los parámetros más importantes para caracterizar la Anisotropía Magnética, son:

- i. La susceptibilidad media determina que tan grande es un elipsoide, además de la confiabilidad de la medida y brinda información sobre los minerales que constituye a la muestra.
- ii. La magnitud de la anisotropía evalúa que tanto difiere el elipsoide de una esfera y así determinar la orientación de los ejes, además de que sus valores están ligados a la mineralogía magnética de la muestra.
- iii. La forma del elipsoide es determinado por la excentricidad, especifica si es alargado (prolado), aplastado (oblado) o neutro (triaxial).

A continuación se muestran algunos parámetros de anisotropía magnética.

Tabla I.2 Muestra algunos parámetros de Anisotropía Magnética. (Tomado de Caballero Miranda, 2011).

| Parámetros de susceptibilidad media | | |
|--|---|------------------------|
| Media aritmética | $K = (k_1 + k_2 + k_3)/3$ | Nagata, 1961 |
| Media geométrica (para un elipsoide) | $K_{geom} = (k_1 + k_2 + k_3)^{\frac{1}{3}}$ | Bucha, 1975 |
| Media geométrica (para una población de elipsoides) | $K_{geom} = \text{antilog} \left[\left(\sum_i^n \log K \right) / n \right]$ | Tarling y Hrouda, 1993 |
| Parámetros de Magnitud de Anisotropía | | |
| Grado de anisotropía | $P_2 = k_1/k_2$ | Nagata, 1961 |
| Anisotropía absoluta | $(k_1 - k_3)/k_2$ | Rees, 1966 |
| Anisotropía total | $H = (k_1 - k_3)/K$ | Owens, 1974 |

Cada elipsoide corresponde con la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética de una muestra, ya que corresponde a un conjunto de especímenes al cual se le realiza un análisis estadístico direccional para obtener el tipo de fábrica magnética.

I.3.7.1 Tipos de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética

La Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS) es la suma del efecto de todos los minerales contenidos en la muestra, es decir, del proceso geológico de formación. Otro factor a considerar es el tipo de partículas contenidas, así como el porcentaje de minerales magnéticos presentes. La clasificación de anisotropías está en función del tipo y la cantidad de minerales magnéticos, y se da la siguiente forma.

- La *anisotropía magnetocristalina* se da en materiales donde la magnetización se alinea de forma preferencial en uno de sus ejes o planos.
- La *anisotropía de forma* se da en granos de minerales alargados ya que existe una distribución de carga polar, también depende del tamaño de los granos y de los cambios de un dominio magnético a otro.

- La *anisotropía textural* es causada por el alineamiento de granos magnéticos para generar líneas o planos.
- La *anisotropía inducida por esfuerzos* es debida a la aplicación de esfuerzos produciendo cambios reversibles e irreversibles en la anisotropía de la muestra.
- La *anisotropía por alineamiento de Dominios Magnéticos*, como su nombre lo define, es causada por la alineación de dominios magnéticos de dominio simple.
- La *anisotropía de intercambio* consiste en el acoplamiento de un grano ferrimagnético con un grano antiferrimagnético, provocando que el grano antiferrimagnético se magnetice de forma paralela al otro grano.

Dado que el proceso geológico de formación de una roca se lleva a cabo bajo distintos procesos y en diferentes periodos de tiempo, se han desarrollado diversas técnicas para clasificar el tipo de anisotropía dependiendo de si se está estudiando un mineral paramagnético o ferromagnético.

- i. La Anisotropía de Remanencia se da en materiales ferromagnéticos bajo distintos procesos. En función del proceso se tiene un tipo de magnetización, como la Magnetización Termorremanente (TRM) y la Magnetización Detrítica (DRM), entre otras.
- ii. La Anisotropía en Bajas Temperaturas es posible en materiales paramagnéticos ya que de acuerdo con la ley de Curie-Weiss, a temperaturas relativamente bajas estos materiales se comportan como los ferromagnéticos.
- iii. La Anisotropía Magnética de Susceptibilidad de Campos Altos consiste en medir la anisotropía aplicando un campo magnético alto para eliminar el aporte de materiales paramagnéticos y la contribución de la fábrica inversa.
- iv. La Anisotropía de Susceptibilidad por Calentamiento consiste en calentar materiales originalmente paramagnéticos con el fin de inducir la formación de materiales ferromagnéticos y así producir una fábrica equivalente a la original pero de más fácil medición.

Análisis de Materiales

I.3.8 Análisis de Materiales por Fluorescencia de Rayos X

En la actualidad se han introducido nuevas técnicas de análisis de materiales, una de ellas es la *Espectroscopia por Fluorescencia de Rayos X*, la cual es capaz de determinar el contenido y la composición elemental de diversos materiales.

El análisis de materiales por Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X tiene como principio físico la emisión de fotones de rayos X, debida a la ionización en capas profundas de los átomos de la muestra al incidir partículas cargadas o radiación electromagnética.

Como se muestra en la Figura I.10, a) al incidir una partícula cargada contra un átomo y éste colisiona con otro electrón de una órbita interna, ioniza al átomo. Entonces, b) un electrón de una órbita superior decae a la órbita vacía (de menor energía), emitiendo un fotón con una energía característica asociada a este decaimiento.

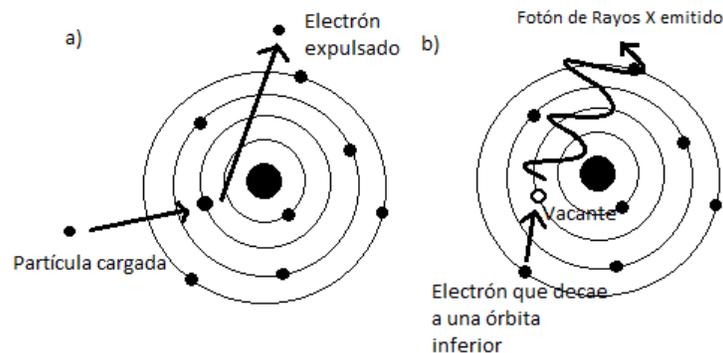


Figura I.10 Muestra la Emisión de Rayos X inducida por una partícula cargada (Ruvalcaba, 2011).

La partícula incidente puede colisionar con cualquier electrón de cualquier capa; pero no cualquier electrón de una órbita superior puede decaer a la órbita vacía, debido a las reglas de selección para las transiciones electrónicas.

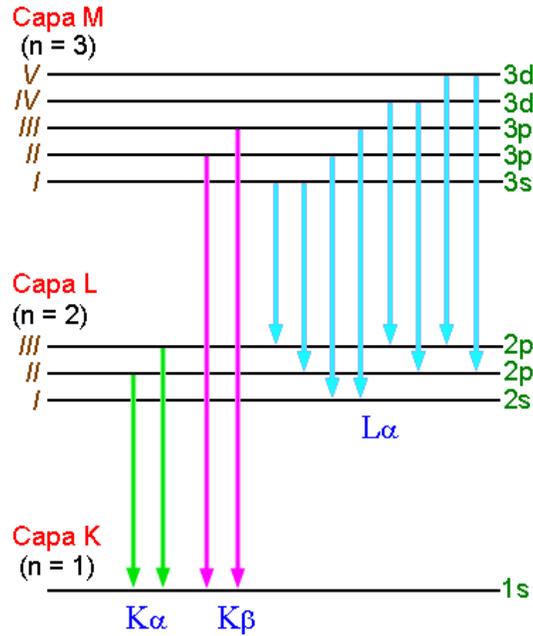


Figura I.11 Muestra los niveles de energía con sus correspondientes transiciones electrónicas permitidas con la Nomenclatura de Siegbahn (Griffith, 2008).

Debido a la degeneración en los niveles de Energía hay dos tipos de transiciones, las *radiativas* y las *no radiativas*. Las transiciones *radiativas* son aquellas entre capas (K, L y M), siguiendo las reglas de selección, y las transiciones *no radiativas* son entre subcapas; por ejemplo si un átomo se ioniza en la subcapa M_{IV} , un electrón de la subcapa M_V caerá a M_{IV} dejando una vacante en la capa M, a estas transiciones se les conoce como transiciones *Coster-Kronig*.

Cada fotón de rayos X emitido tendrá una longitud de onda asociada a una transición relativa con una energía única para cada átomo entonces se obtendrá un espectro de energía asociado para cada elemento. Del mismo modo, la cantidad de rayos X característicos es proporcional a la concentración de cada átomo dentro del material, por lo que se puede determinar la concentración por elemento sí se cuenta con un detector lo suficientemente sensible.

Capítulo II

Campo Magnético Terrestre

II.1 Geomagnetismo

El Geomagnetismo es la rama de la Geofísica encargada del estudio del Campo Magnético Terrestre (CMT) así como su variación espacial y temporal. Para una descripción detallada del CMT, es necesario conocer distintas áreas del conocimiento como la geología, la física, la geografía y la astronomía, entre otras.

El Campo Magnético Terrestre puede describirse por dos orígenes, un campo interno y un campo externo. El campo magnético interno puede describirse físicamente por medio de un dipolo magnético ubicado en el centro de la Tierra con una desviación de 11.5° con respecto al eje de rotación terrestre con una Variación Secular en el tiempo. El campo magnético externo es causado por factores superficiales, tales como la interacción de la actividad solar con la ionosfera y la Magnetosfera, entre otros.

II.2 El Campo Magnético Terrestre

El campo magnético terrestre es imperceptible a los sentidos humanos, sabemos de su existencia debido a sus efectos sobre algunos materiales. Del Capítulo I, se sabe que una corriente eléctrica genera un campo magnético entonces, de forma

simple se puede suponer que el CMT es generado por una corriente eléctrica dentro del planeta, como se muestra en la Figura II.1.

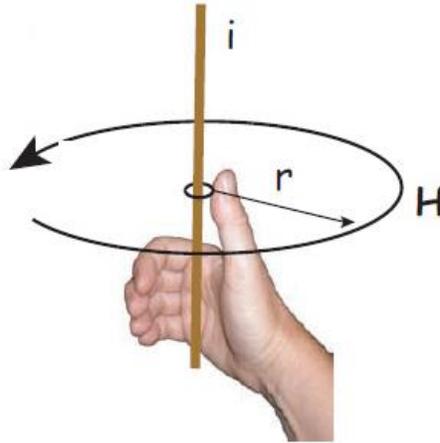


Figura II.1 Ejemplifica el modelo más simple del origen del CMT en un sistema derecho (Merril et al., 1983).

La magnitud del campo magnético Terrestre H es proporcional a la corriente eléctrica i , dada por:

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad \dots \text{(II.1)}$$

Donde r es el radio por donde circula corriente eléctrica i . También se puede calcular el momento magnético que depende de la corriente eléctrica y del área por donde circula dicha corriente, dado por:

$$m = i\pi r^2 \quad \dots \text{(II.2)}$$

Sin embargo, la ecuación anterior solo es válida para un ciclo. Generalizando para n ciclos, se tiene:

$$m = ni\pi r^2 \quad \dots \text{(II.3)}$$

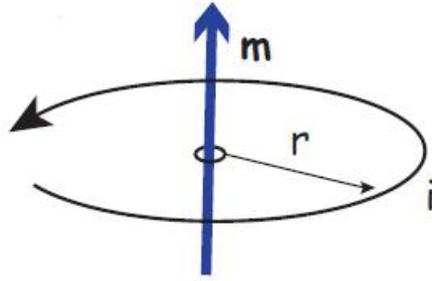


Figura II.2 Muestra el momento magnético generado por una corriente eléctrica de una espira (modificado de Tauxe, 2010).

El campo magnético es un vector, ya que en cada punto tiene una dirección y una magnitud; de forma simple, este campo es representado por líneas de flujo magnético. Entonces la densidad de flujo es una medida de la fuerza del campo magnético, a la que llamaremos *Inducción Magnética B*.

Notemos que en Paleomagnetismo, la inducción magnética denotada por B y el campo magnético H se usa de forma indistinta, pero en el Capítulo I se mostró que están relacionadas por:

$$B = \mu_0(H + M) \quad \text{con} \quad \mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ kg m A}^{-2}$$

Donde M es la magnetización y μ_0 es la permeabilidad en el vacío.

La divergencia de cualquier campo cuantifica el flujo neto a través de cualquier superficie cerrada alrededor de una partícula, partiendo de esto, la divergencia de un campo eléctrico generado por una partícula cargada es diferente de cero ya que el flujo neto es distinto de cero, como se puede observar en la Figura II.3 a). Usando esta misma lógica, y sabiendo que la divergencia del campo magnético es cero entonces el flujo neto es cero, como se observa en la Figura II.3 b).

Por lo tanto, no existen los monopolos magnéticos, es decir, los polos magnéticos solo existen en pares para que cumpla la divergencia del campo.

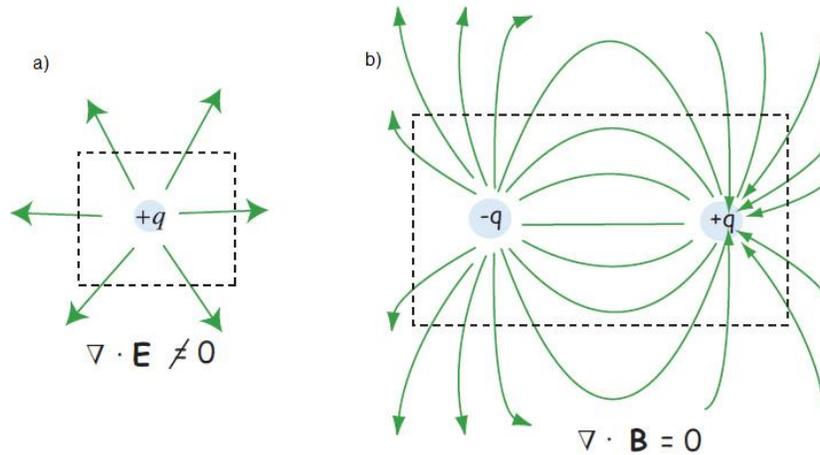


Figura II.3 Muestra esquemáticamente la divergencia del a) campo eléctrico y del b) campo magnético (Reitz et al., 1983).

II.3 Componentes vectoriales del Campo Magnético Terrestre

En el apartado anterior, se mostró que un dipolo es el arreglo más simple para la descripción de un campo magnético entonces para una descripción simple del CMT se considerará un dipolo alineado con el eje de rotación de la Tierra, como se muestra en la Figura II.4 a). Sin embargo, el dipolo axial geocéntrico es solo una aproximación ideal del campo magnético terrestre, las líneas de campo producidas por el campo real son esquematizadas en la Figura II.4 b).

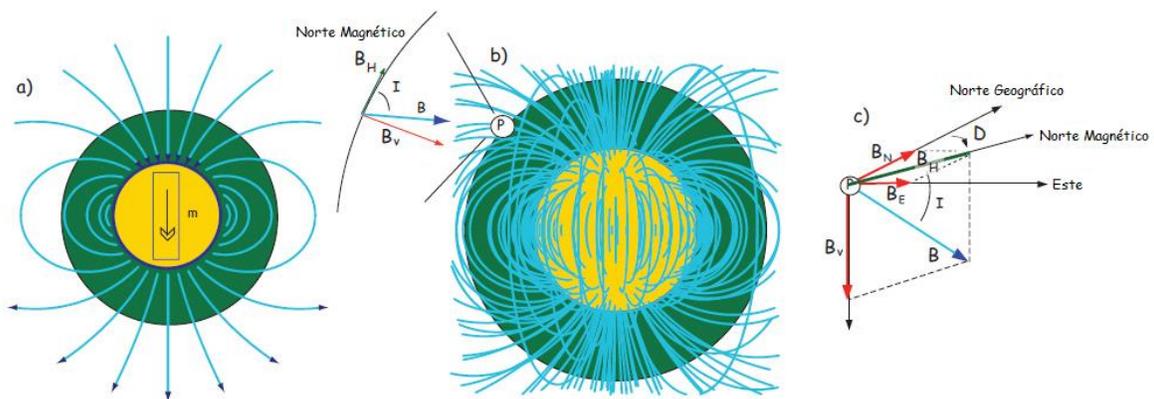


Figura II.4 Muestra a) las líneas de flujo producidas por el dipolo axial geocéntrico, b) las líneas de flujo producidas por el campo magnético terrestre en 2005 y c) los componentes del vector magnético terrestre donde I es la inclinación magnética, D es la declinación magnética y B es la inducción magnética con componentes horizontal B_H , vertical B_V , norte B_N y este B_E (modificado de Tauxe, 2010).

El CMT en un punto sobre la superficie terrestre está definido por dos ángulos: inclinación I y declinación D , y la magnitud del vector B . La inclinación es el ángulo con el plano horizontal, puede ser positivo o negativo según en el hemisferio donde se localice el punto. La declinación es el ángulo que forma la proyección horizontal del campo B_H con el norte geográfico, se define positivo en el sentido de las manecillas del reloj desde el norte.

Las componentes horizontal B_H , vertical B_V , norte B_N y este B_E se pueden expresar en función de los ángulos de Inclinación y Declinación, por:

$$B_V = B \sin I \quad \dots \text{(II. 4)}$$

$$B_H = B \cos I \quad \dots \text{(II. 5)}$$

$$B_N = B \cos I \cos D \quad \dots \text{(II. 6)}$$

$$B_E = B \cos I \sin D \quad \dots \text{(II. 7)}$$

Debido a que el campo magnético es potencial cumple con la ecuación de Laplace y por tanto su potencial ψ_m puede determinarse mediante armónicos esféricos para un campo interno ($r \geq a$):

$$\psi_m(r, \theta, \phi) = \frac{a}{\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} P_l^m(\cos\theta) [g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi] \quad \dots \text{(II. 8)}$$

Donde P_l^m son los polinomios normalizados de Schmidt, g_l^m y h_l^m los coeficientes de Gauss, θ es la co-latitud, ϕ es la longitud y a es el radio terrestre.

Como se ha explicado al inicio de este capítulo, los monopolos magnéticos no existen, por lo que no se considera $l = 0$ y por tanto, el modelo más simple es considerar un campo magnético dipolar axial:

$$\psi_m = \frac{a}{\mu_0} g_1^0 \left(\frac{a}{r}\right)^2 P_1^0(\cos\theta) \quad \dots \text{(II. 9)}$$

$$\Rightarrow \psi_m = \frac{a}{\mu_0} g_1^0 \left(\frac{a}{r}\right)^2 \cos\theta \quad \dots \text{(II. 10)}$$

Para obtener las componentes vectoriales del campo magnético, se calcula el gradiente del potencial dado por:

$$(B_N, B_E, B_V) = -\mu_0 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta}, \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi_m}{\partial \phi}, \frac{\partial \psi_m}{\partial r} \right) \quad \dots \text{(II. 11)}$$

donde,

$$(B_N, B_E, B_V) = \left(g_1^0 a^3 \frac{\sin \theta}{r^3}, 0, 2g_1^0 a^3 \frac{\cos \theta}{r^3} \right) \quad \dots \text{(II. 12)}$$

Como el campo es dipolar, éste depende de la latitud geográfica (λ) y por tanto:

$$\tan I = \frac{B_V}{B_N} = 2 \cot \theta = 2 \tan \lambda \quad \dots \text{(II. 13)}$$

Y la intensidad se puede expresar en términos de la colatitud θ :

$$B = (B_V^2 + B_N^2)^{1/2} = \frac{g_1^0 a^3}{r^3} (\sin^2 \theta + 4 \cos^2 \theta)^{1/2} \quad \dots \text{(II. 14)}$$

$$\Rightarrow B = \frac{g_1^0 a^3}{r^3} (1 + 3 \cos^2 \theta)^{1/2} \quad \dots \text{(II. 15)}$$

II.3.1 Polos Virtuales Geomagnéticos

El Campo Magnético Terrestre descrito con la teoría del dipolo magnético parece adecuado, sin embargo, la rotación y la traslación de continentes debido a la propia dinámica del planeta provoca una disparidad en los resultados, por lo cual es necesario introducir un nuevo concepto.

El Polo Geomagnético Virtual o VGP (Virtual Geomagnetic Pole) según Tauxe, es:

"El punto sobre el planeta que corresponde al Polo geomagnético de este dipolo imaginario."

Entonces, para localizar un punto sobre la superficie es necesario conocer las coordenadas de latitud (λ) y de longitud (ϕ). La longitud toma valores de 0 a 360°, la colatitud de 0 a 180°, y la latitud se relaciona con la colatitud por $\lambda = 90 - \theta$.

Otro parámetro es la colatitud magnética θ_m en términos de la inclinación que está dada por:

$$\cot \theta_m = \frac{1}{2} \tan I \quad \dots \text{(II. 16)}$$

El punto de observación es S y el polo es P, como se muestra en la Figura II.5.

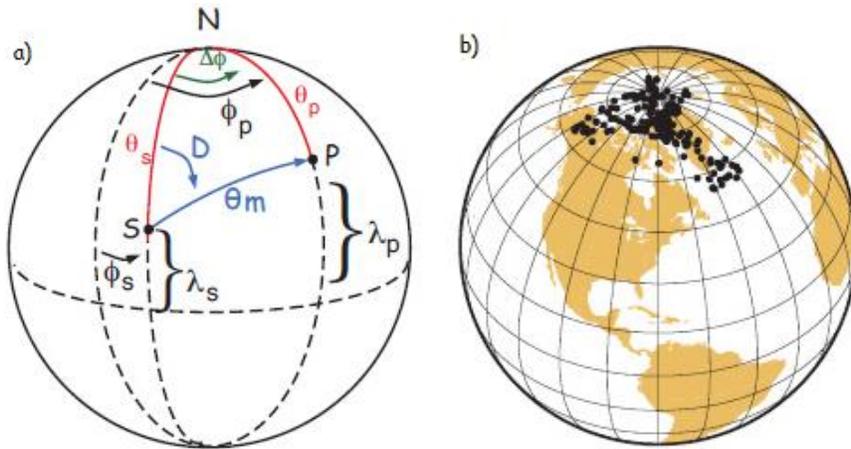


Figura II.5 a) Muestra al dipolo P y al punto de observación S localizados geoméricamente sobre la superficie de la esfera. b) Muestra las posiciones de los VGP convertidos en direcciones (modificado de Tauxe, 2010).

Para localizar al VGP se usa trigonometría esférica y se obtiene la colatitud:

$$\cos \theta_p = \cos \theta_s \cos \theta_m + \sin \theta_s \sin \theta_m \cos D \quad \dots \text{(II. 17)}$$

Y la declinación:

$$\cos D = \frac{\cos \theta_p - \cos \theta_s \cos \theta_m}{\sin \theta_s \sin \theta_m} \quad \dots \text{(II. 18)}$$

A partir de la ecuación (II. 15) se puede obtener el momento del dipolo virtual:

$$VDM = \frac{4\pi r^3}{\mu_0} B_{antiguo} (1 + 3 \cos^2 \theta_m)^{1/2} \dots \text{(II. 19)}$$

Esta descripción está basada en el modelo de un dipolo axial geocéntrico. Sin embargo, las componentes del campo geomagnético tiene cambios lentos en el tiempo debido a que el patrón de flujo en el núcleo terrestre tiene variaciones, a esto se le conoce como *variación secular*.

II.4 Variación secular

El campo magnético terrestre presenta variaciones espaciales y temporales. Al cambio temporal del campo interno con variaciones temporales de décadas a milenios recibe el nombre genérico de *variación secular*.

El campo magnético cambia en magnitud y en dirección debido a la variación de las componentes del campo dipolar y no-dipolar, por lo que la variación secular tendrá una diferencia significativa entre una región y otra.

Los cambios de la declinación e inclinación en un punto dado constituyen las primeras observaciones de la Variación Secular. En la Figura II.6 se representan la curva de variación de *D* e *I* en Greenwich entre 1600 y 1950.

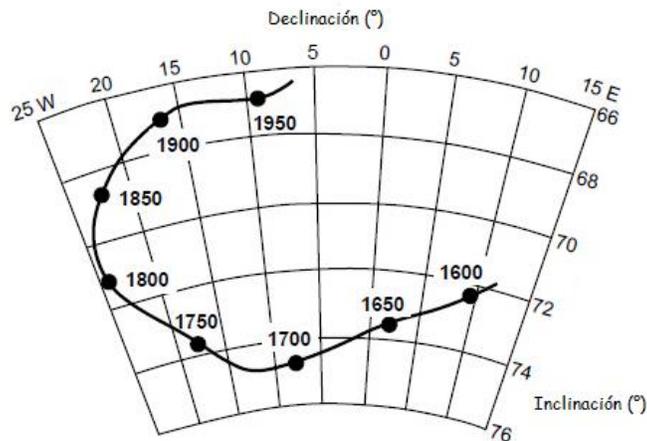


Figura II.6 Variación Secular de la declinación e inclinación en Greenwich, Londres (Modificado de Butler, 1992).

La Variación Secular tiene dos componentes, la primera es la deriva hacia el oeste del campo no-dipolar a una velocidad de desplazamiento de 0.18 por año, esta deriva se puede observar en mapas magnéticos de una sola región. La segunda es la disminución lineal del 8% en el momento dipolar durante los últimos 150 años.

Estas variaciones ocurren en distintas escalas de tiempo y son causadas por diferentes factores, como muestra la siguiente tabla.

Tabla II.1 Muestra las variaciones del campo magnético, duración y causa (Merril et al, 1983).

| Tipo de Variación | Tiempo (s) | Origen de la Variación |
|---|--|---|
| Muy cortas Micropulsaciones Variaciones subacústicas | 3.0×10^{-1} a 3.0 | Asociadas al campo externo |
| Tormentas magnéticas Variación Diurna | 1.0×10^2 | |
| Variación Secular Variación en el momento dipolar geomagnético | 3.0×10^9 a 3.0×10^{10} | Campo no dipolar (turbulencia en el núcleo) |
| Excursiones | 1.0×10^{14} | Inversiones abortadas |
| Variaciones de intensidad | 3.0×10^{11} | Campo dipolar |
| Paleovariación Secular | 3.0×10^{12} | Campo no dipolar y variaciones en el dipolo |
| Cambios de Polaridad | 3.0×10^{14} | Campo dipolar y no dipolar interno |

Así, el paleomagnetismo corrobora que el campo magnético de la Tierra ha sufrido cambios continuos de intensidad e inversiones de polaridad a lo largo de las épocas geológicas. Al mismo tiempo, es posible que haya existido una verdadera migración de los polos geomagnéticos.

En la Figura II.7 se muestra el resultado del cálculo de los polos en sus direcciones medias del campo geomagnético en intervalos de 100 años en ocho regiones del planeta para los últimos dos mil años. Finalmente, en el círculo gris, que es el promedio de todos los polos para los últimos dos mil años, se puede observar como el polo resultante es muy cercano al eje de rotación del planeta.

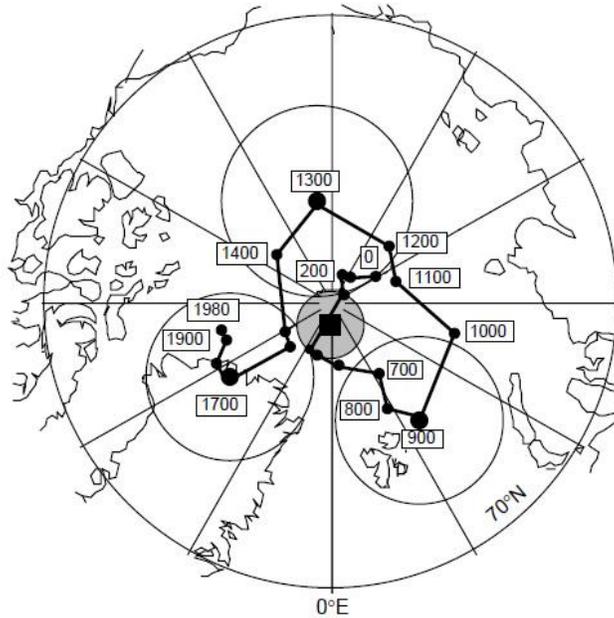


Figura II.7 Posiciones del polo norte geomagnético para los últimos 2000 años. (Modificado de Butler, 1992).

La lenta variación del campo con el tiempo se debe a la reorganización de las líneas de fuerza en el núcleo. La variación en la amplitud y en la dirección del campo dipolar probablemente es producto de las oscilaciones en el flujo dentro del núcleo.

Se denomina Variación Secular a los cambios temporales de la declinación e inclinación magnética, y la intensidad del campo. Este fenómeno se presenta a nivel global pero con diferencias locales, esto es debido a la tectónica de placas.

El Arqueomagnetismo consiste básicamente en determinar la dirección media (declinación e inclinación) de la muestra, para después comparar dicha dirección con la curva maestra y así obtener las dataciones más probables.

Los estudios de Variación Secular han permitido establecer una referencia temporal y por tanto, un método de datación. Por ello, es muy importante construir una buena curva de Variación Secular de referencia del campo geomagnético en la región de estudio.

II.5 Magnetismo de Rocas

En este apartado se discutirán los procesos físicos por los cuales el Campo Magnético Terrestre (CMT) es grabado en las rocas durante su proceso de formación, y para ello se utilizarán conceptos físicos ya descritos en el Capítulo 1.

Como se ha mencionado, un material ferromagnético tiene la capacidad de magnetizarse de forma permanente (Magnetización Remanente) sí se le induce un campo magnético externo durante su formación (Magnetización Inducida). En Paleomagnetismo, este fundamento físico permite el estudio de las variaciones del CMT, al quedar grabado en las rocas y al datarlas tener un marco temporal.

II.5.1 Magnetización Remanente

La Magnetización Remanente en un material ferromagnético se le denomina Magnetización Remanente Natural (NRM), la cuál es la suma de una componente primaria adquirida durante la formación y una componente secundaria adquirida en cualquier momento después de la formación.

La Magnetización Remanente se da por diferentes procesos físicos, en aplicaciones Arqueomagnéticas solo se consideran dos fundamentalmente, la Magnetización Termorremanente (TRM) y la Magnetización Detrítica (DRM).

- La Magnetización Termorremanente (TRM).

El calentamiento por encima de la Temperatura de Curie T_c borra toda la historia magnética del material y al enfriarse lentamente en presencia de un campo magnético externo hasta su punto de bloqueo, éste guarda la nueva magnetización. El punto de bloqueo de cada material está en función del tamaño y la forma del grano, y puede ser igual o menor a la temperatura de Curie.

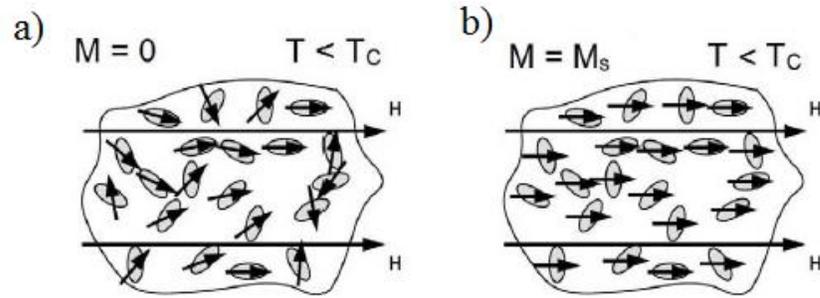


Figura II.8 Adquisición de TRM a) Antes de adquirir la magnetización y b) después de adquirir la magnetización. Donde M es la magnetización, Ms es la magnetización de saturación, T es la temperatura y Tc es la temperatura de Curie. (Modificado de Buttler, 1992).

- La Magnetización Remanente Detrítica (DRM).

Durante el depósito de sedimentos y la consolidación de rocas (litificación), los granos ferromagnéticos se alinean con el campo magnético terrestre y dan origen a esta magnetización. Los granos oblongos o alargados con el momento magnético en el eje mayor rotan al depositarse provocando una menor Inclinación.

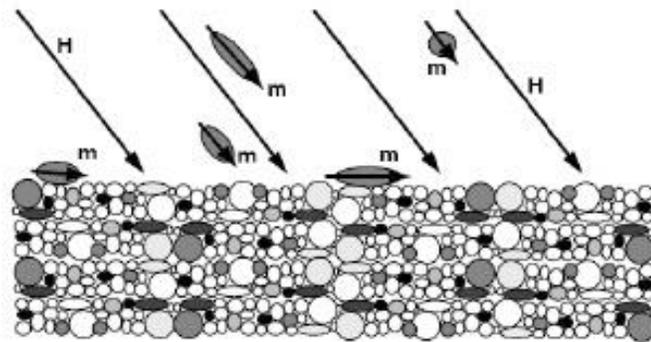


Figura II.9 Muestra el depósito de granos ferromagnéticos con momento magnético m en un campo externo H . (Modificado de Buttler, 1992).

Estos tipos de magnetización son de nuestro interés ya que algunos de los materiales arqueológicos son hornos o pisos quemados (TRM), y cuando los pisos son no quemados el fenómeno físico que explica esta magnetización es la magnetización remanente detrítica (DRM).

Dado que la magnetización primaria nos brinda información fundamental para el estudio Arqueomagnético, es necesario realizar un lavado magnético para remover las componentes secundarias. El lavado magnético se puede realizar por

el método de campos alternos crecientes o por una desmagnetización térmica progresiva. El lavado magnético mediante el método de campos alternos crecientes consiste en aplicar un campo débil a la muestra, para así provocar que los granos con menor coercitividad se alinean a él entonces, al reducir la intensidad del campo solo quedarán las remanencias de las partículas con coercitividades mayores, es decir, después de realizar el lavado magnético se removerán las componentes secundarias como se verá a detalle en el Capítulo IV. Mientras que la desmagnetización térmica consiste en calentar la muestra a una temperatura por debajo de T_c (Temperatura de Curie) para materiales ferromagnéticos dejando que se enfríe bajo un campo nulo ($H=0$), esto implica que los granos con temperatura T_c menor a la temperatura expuesta adquieran una magnetización remanente con lo que se borra la Magnetización Remanente Natural (NRM) de los granos en la muestra.

Capítulo III

Contexto Arqueológico

III.1 Introducción

El sitio arqueológico de Ndachjian Tehuacán se localiza en una meseta al pie de una elevación conocida como Cerro Colorado, en el Municipio del mismo nombre del poblado de San Diego Chalma, a quince minutos de Tehuacán. Su importancia en la historia prehispánica comienza en el periodo clásico, la zona arqueológica de Tehuacán fue asiento del pueblo Popoloca y su apogeo corresponde al post clásico desde el siglo XIII hasta el siglo XV cuando fueron sometidos por los Mexicas que eran gobernados por Moctezuma Ilhuicamina (López-Valenzuela, 2010).

III.2 Los Popolocas

Los Popolocas habitaron al sur del estado de Puebla y al norte de Oaxaca durante el periodo Clásico, su época de apogeo fue durante el período post clásico principalmente desde la caída de Tula hasta la conquista Mexica en siglo XV.

Los Popolocas son un grupo étnico confundido con los Chochos y los Mixtecos debido a las escasas investigaciones. La cercanía de los Chochos y los Popolocas

es muy estrecha, ya que en el siglo XI eran un solo grupo y su gradual separación cultural y lingüística los llevo a dos grupos étnicos distintos. También, la cercanía regional con los Mixtecos ha provocado que los Popolocas sean confundidos con ellos. Ambos pueblos habitaban la región geográfica conocida como Mixteca, subdividida en tres regiones: la Mixteca Baja (sur de Puebla y norte de Oaxaca), la Mixteca Alta (Oaxaca) y la de la Costa (Oaxaca) (Gámez, 2006).

Según los estudios realizados por MacNeish (1964), los Proto-otomangues (antecesores de los Popolocas) iniciaron la domesticación de plantas como el chile, el amaranto, el aguacate, la calabaza, el izote, el nopal, la ciruela, el maguey, el mezquite, etc. y para el 5000 antes de nuestra era comenzaron la domesticación del maíz. Los Popolocas del valle de Tehuacán desarrollaron importantes obras hidráulicas así como la agricultura de irrigación, implementando el uso de terrazas, canales y pequeños depósitos.

En siglo XI, la zona sur de Puebla fue invadida por grupos nahuas debido a la posición estratégica y a sus riquezas. Algunos de los grupos invasores fueron los Toltecas, Nonoalcas, Chichimecas, Tlatelolcas y Mexicas. A partir de estos sucesos, la estructura política y territorial se vio modificada creando nuevos poblados.

Durante el período post clásico, los Popolocas estaban organizados en grandes provincias gobernadas por un gran señorío, conocido como Señorío Mayor que dependía de otros señoríos menores, es decir, tenían una organización piramidal. Las provincias popolocas fueron: Tecamachalco, Tepexi y Tehuacán en Puebla, y Coixtlahuacan en Oaxaca.

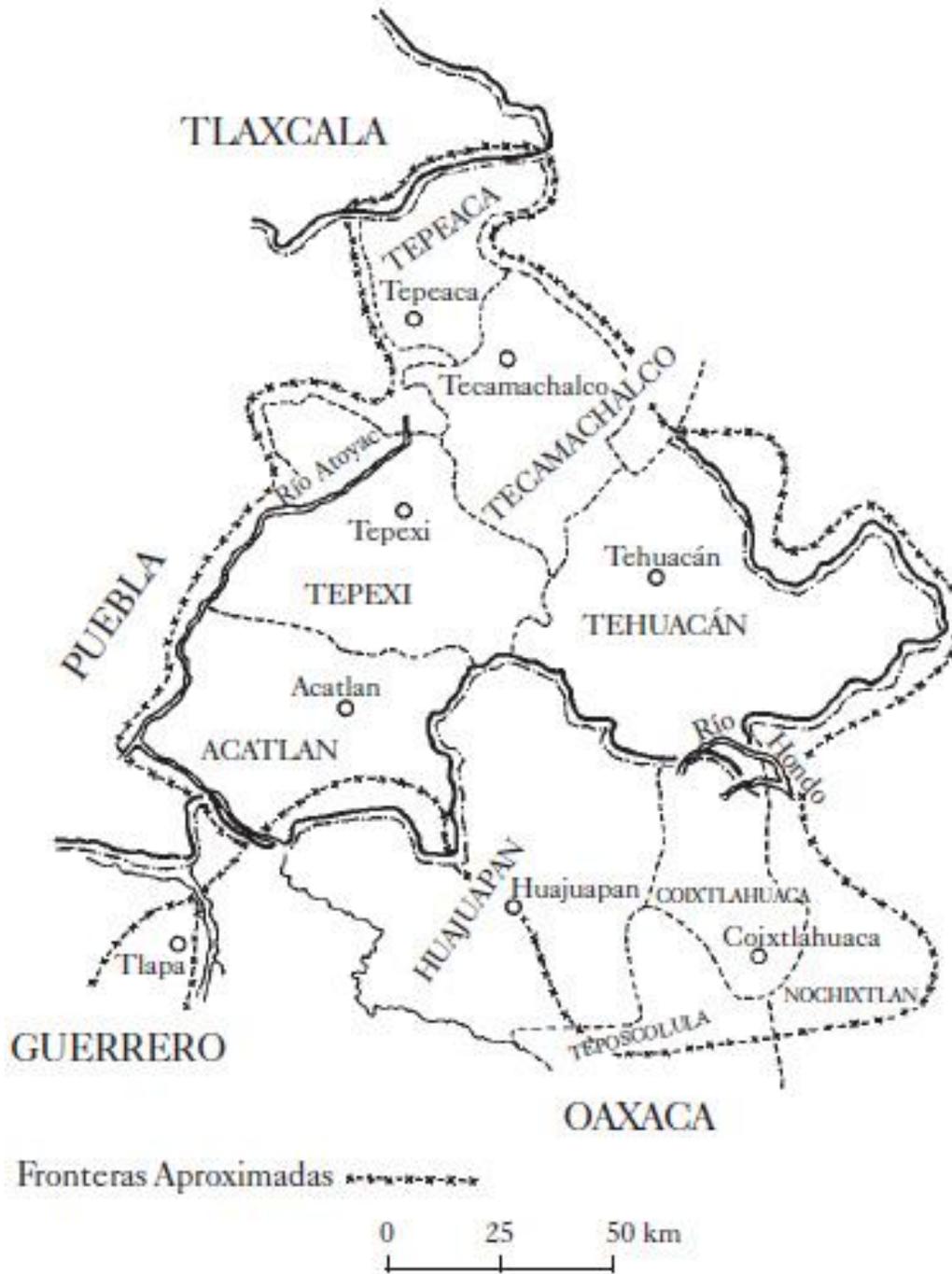


Figura III.1 La región popoloca en el momento de la Conquista Española (según Nicolas León). (Jäcklein, 1979).

El sitio arqueológico de Ndachjian Tehuacán se localiza en una meseta al pie de una elevación como Cerro Colorado, en el Municipio del mismo nombre del poblado de San Diego Chalma.

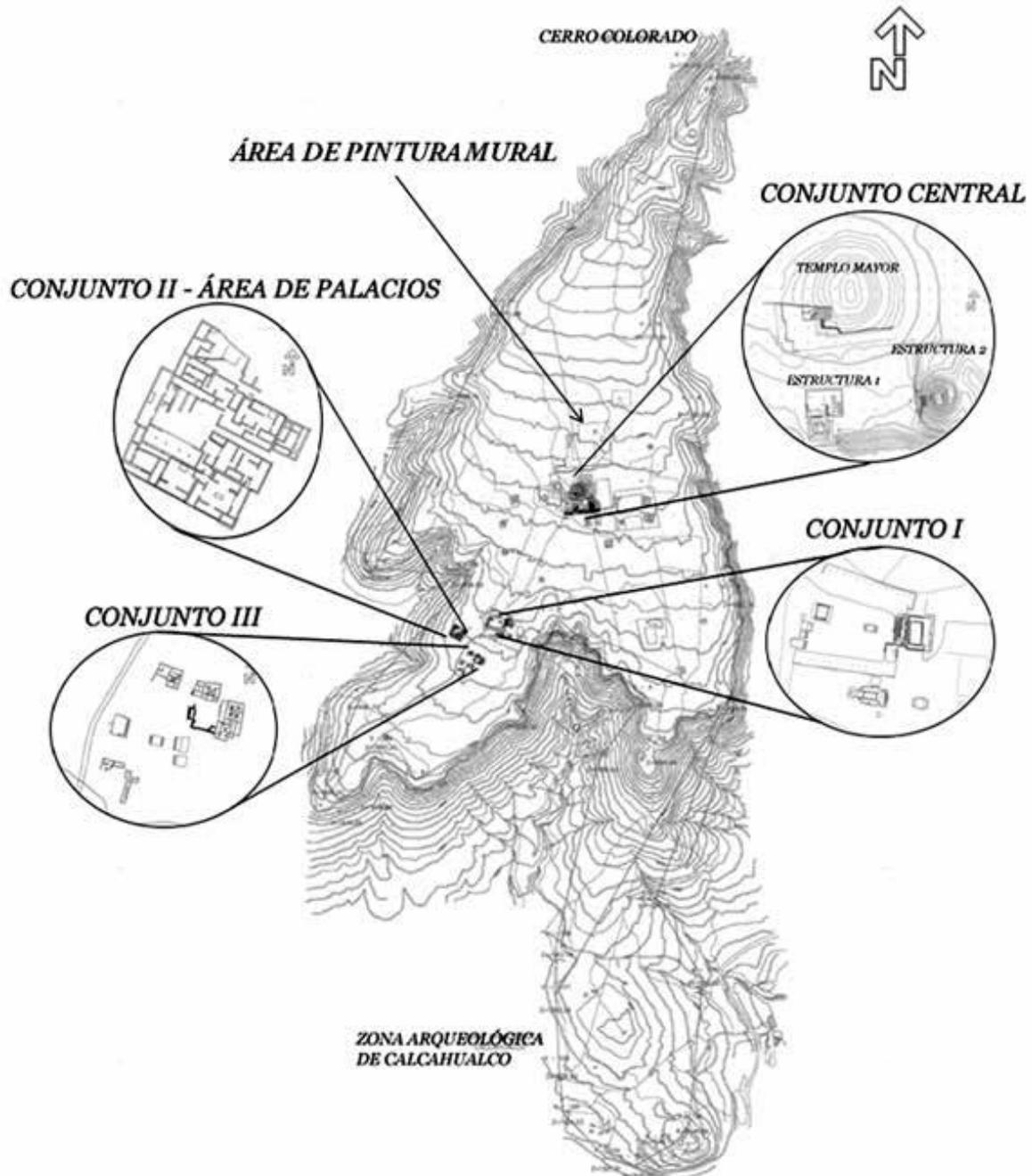


Figura III.2 Los Popolocas en Tehuacán el Viejo (Castillo, 2009).

Durante el post clásico mesoamericano, el señorío de Tehuacán fue el señorío más importante del área central (junto con los señoríos de Tepexi y Cuthá) y bajo el cual debieron estar otros señoríos Popolocas menos importantes (Castillo Tejero, 1995). Este sistema de señoríos continuó después de la época de dominación Mexica y se implementaron las alianzas matrimoniales para lograr el dominio de más regiones, sin embargo, esto no aseguraba que todos los señoríos se sometieran lo cual provocaba disturbios.

El apogeo del señorío de Tehuacán ocurrió durante los siglos XII al XV y a mediados de este último siglo fue conquistado por los mexicas, durante el reinado de Moctezuma I. Antes de la conquista Mexica, el área edificada estaba básicamente en la meseta y después la localización de los señores de Tehuacán fue bajada al valle a la zona conocida actualmente como Calchahualco, donde fueron conquistados por los españoles. Después de la conquista española, se realizaron edificaciones sobre esta zona para luego posteriormente ser abandonadas. En ese mismo siglo, la población se desplazó al actual Tehuacán (López-Valenzuela, 2010).

III.3 Cronología

De acuerdo al contexto histórico, el asentamiento Popoloca en Ndachjian Tehuacán tiene un período de tiempo definido entre el período post clásico (900 d.C.) al contacto con los españoles (1521 d.C.).

La Tabla muestra la cronología Mesoamericana según la clasificación de López et al. (Mayo-Junio, 2000).

Tabla III.1 Criterios utilizados para la periodización de Mesoamérica (López et al., 2000).

| Criterio | Manifestación | Período | Fecha |
|--|--|-----------------------|--------------|
| Patrón de subsistencia | Sedentarismo agrícola | Preclásico Temprano | 2500 a.C. |
| Relación de producción | Jerarquización social | Preclásico Medio | 1200 a.C. |
| Relaciones político-económicas regionales | Capitales protourbanas | Preclásico Tardío | 400 a.C. |
| Diferenciación campo-ciudad | Urbanismo | Clásico Temprano | 150-200 d.C. |
| Relaciones político-económicas interregionales | Declive de los grandes estados hegemónicos y proliferación de capitales regionales | Clásico Tardío | 650 d.C. |
| Relaciones políticas hegemónicas | Regímenes supraétnicos zuyuanos | Post Clásico Temprano | 900 d.C. |
| Relaciones políticas de dominio centralizado | Ruptura de regímenes de zuyuanos | Post Clásico Tardío | 1200 d.C. |
| Fin de Mesoamérica | Conquista | Colonia | 1521 d.C. |

Capítulo IV

Bases Teóricas del Método Arqueomagnético

IV.1 Introducción

El Arqueomagnetismo se encarga del estudio de materiales arqueológicos con niveles considerables de óxido de hierro, los cuales registran la variación temporal del Campo Magnético de la Tierra; así como caracterizar sus propiedades magnéticas mediante otras técnicas. Las diversas investigaciones del Arqueomagnetismo se enlistan a continuación.

- i. Estudio de las variaciones espacio-temporales del Campo Geomagnético en determinada zona.
- ii. Datación de estructuras y eventos.
- iii. Identificación de instrumentos que indicarían el conocimiento del campo geomagnético por diversas culturas.
- iv. El estudio de orientaciones de construcciones.
- v. Propiedades magnéticas de materiales empleados para la elaboración de objetos para identificar las fuentes de dichos materiales.

IV.2 Magnetización en Estructuras Arqueológicas

La adquisición de la magnetización en materiales arqueológicos es de dos tipos: termorremanente y detrítica.

La adquisición de magnetización de tipo termorremanente guarda la dirección principal del CMT durante su última exposición al fuego.



Figura IV.1 Muestra la magnetización termorremanente en estructuras arqueológicas (Soler-Arechalde, 2006).

Como se ha mencionado, la adquisición de magnetización de tipo detrítica es adquirida durante el depósito y litificación de los sedimentos, ya que en la mayoría de los ambientes sedimentarios abundan minerales magnéticos como la magnetita y titanomagnetita pobre en titanio. Este tipo de magnetización está en función de la forma del grano; por ejemplo, si el grano ferromagnético es elongado u oblado con respecto al momento magnético en el eje mayor, éste rotará hacia el plano horizontal y se obtendrá un menor inclinación.

Una vez identificada el tipo de magnetización, se procede a medir la NRM de todos los especímenes con su correspondiente corrección.

IV.3 Medición de la Magnetización y Correcciones

En el laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica, se utiliza el Magnetómetro de Giro JR6 que determina el momento magnético del espécimen en coordenadas de la muestra (M_x, M_y, M_z) . Luego, estas coordenadas de cada espécimen son transformadas a coordenadas geográficas de Declinación, Inclinación y Magnetización (D, I, M) por el programa de computo REMA6, este software también calcula correcciones geográficas y estructurales.

En la práctica, ya que se tienen las coordenadas de la muestra *in situ*, el volumen v de la muestra y las componentes del momento magnético (M_x, M_y, M_z) , se puede obtener el momento magnético total M que está dado por:

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \dots (IV.1)$$

La magnetización remanente natural (NRM) se define como:

$$NRM = \frac{M}{v} \dots (IV.2)$$

Como las coordenadas de la magnetización están en función de las coordenadas del espécimen, la inclinación I_s y la declinación D_s , entonces:

$$I_s = \tan^{-1} \left(\frac{M_z}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} \right) \dots (IV.3)$$

$$D_s = \tan^{-1} \left(\frac{M_y}{M_x} \right) \dots (IV.4)$$

Enseguida se realiza la corrección de rumbo A y echado B , mediante la siguiente matriz de rotación.

$$R = \begin{pmatrix} \cos A & -\sin A \cos B & \sin A \sin B \\ \sin A & \cos A \cos B & -\sin B \cos A \\ 0 & \sin B & \cos A \end{pmatrix} \dots (IV.5)$$

Esta corrección consiste en rotar la dirección de la Magnetización Remanente Natural alrededor del eje local del rumbo.

Con las direcciones ya corregidas se procede a graficarlas, para ello se usa una proyección estereográfica la cual se describe en el siguiente apartado.

IV.4 Representación de Magnetización

En Paleomagnetismo, el vector de magnetización tiene tres componentes por lo que es difícil una buena interpretación visual y por este motivo se utiliza una proyección estereográfica. Una proyección estereográfica consiste en representar información tridimensional en un plano, las proyecciones más usadas son la proyección de igual-ángulo o de *Wulff* y la proyección de igual-área o de *Lambert* o *Schmidt*.

La proyección de igual-ángulo (*Wulff*) consiste en un cono definido por vectores que tienen un ángulo dado desde un vector traza, sin embargo, el tamaño del círculo cambia con la dirección del vector central (es más pequeño si el vector central tiene una inclinación mayor, por lo que se localiza cerca del centro de la proyección).

La proyección de igual-área (*Lambert* o *Schmidt*) consiste en que el área del cono de vectores alrededor de un vector central permanecerá constante independientemente de la dirección del vector central, sin embargo, el cono se representa como una elipse excepto cuando el vector central sea vertical. Debido a que nos interesa la cantidad de dispersión y la dirección en la distribución de las direcciones paleomagnéticas, se utiliza la proyección de igual-área.

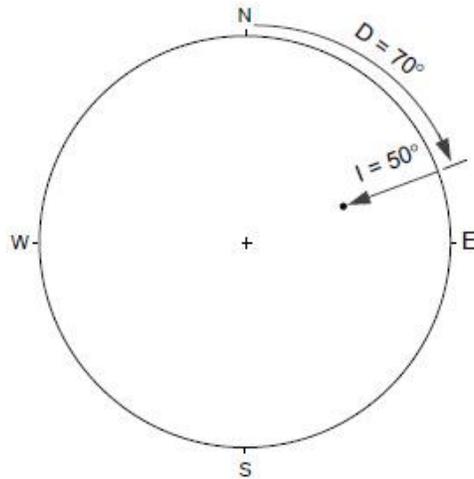


Figura IV.2 Grafica de la dirección $D=70^\circ$ e $I=50^\circ$ en la proyección estereográfica de igual-área (Modificado de Buttler, 1992).

Graficadas las direcciones magnéticas características de cada espécimen de una muestra, se procede a seleccionar *especímenes piloto* a los cuales se les realizará un lavado magnético para eliminar las componentes secundarias.

IV.5 Desmagnetización

Cuando a todas las muestras se les ha medido su NRM, se seleccionan algunos especímenes piloto dependiendo si están agrupadas o no. Para determinar las componentes de la NRM de una muestra se realiza un lavado magnético, que puede ser la aplicación de campos alternos crecientes o calentamientos escalonados.

IV.5.1 Desmagnetización por Campo Alternos

La Desmagnetización por Campo Alternos consiste en aplicar un campo externo débil en un rango de intensidad de 2.5 mT a 100 mT en intervalos predefinidos, y entre cada paso de desmagnetización se mide el espécimen en el magnetómetro. En otras palabras, cuando se aplica este campo externo débil las partículas cuya coercitividad es menor o igual a lo coercitividad de campo aplicado se alinean con

él, y al decaer el campo, las partículas van quedando orientadas al azar, por lo que solo quedarán los granos con una remanencia mayor al campo aplicado, a la par se observará como va decayendo la magnetización del espécimen. Por el tipo de muestras, esta técnica fue empleada en esta tesis.

IV.6 Dirección Magnética Principal

Al emplear el lavado magnético, la dirección característica de cada espécimen se va definiendo. Para determinarla se emplea tanto la red estereográfica como el diagrama de Zijderveld.

En el *Diagrama de Zijderveld* *DZ* se grafica la magnetización en cada paso. El diagrama consiste en una proyección del vector de magnetización sobre el plano horizontal y otra sobre el plano vertical, con uno de los componentes de plano horizontal. El diagrama de Zijderveld se construye graficando el punto final del vector de desmagnetización, el cual es proyectado como dos puntos en dos planos ortogonales: el plano horizontal *A* que contiene el vector $\sqrt{x^2 + y^2}$ y el plano vertical *B* que contiene el vector $x\sqrt{x^2 + y^2}$ o al vector $y\sqrt{y^2 + z^2}$, donde *x*, *y* y *z* son los ejes en coordenadas cartesianas.

$$x = M \cos I \cos D \quad \dots (IV.6)$$

$$y = M \cos I \sin D \quad \dots (IV.7)$$

$$z = M \cos I \quad \dots (IV.8)$$

Como se muestra en la siguiente figura.

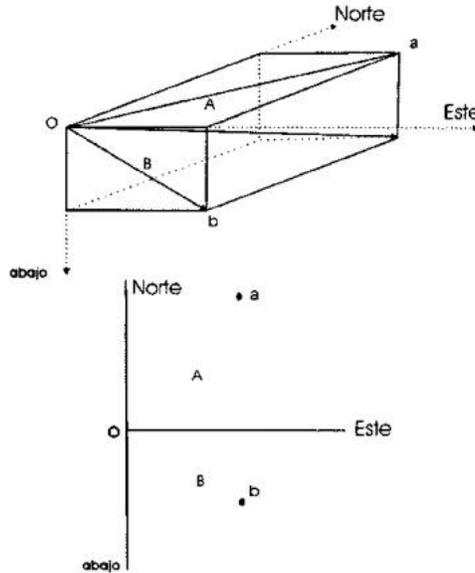


Figura IV.3 Construcción del Diagrama de Zijderveld. Donde A y B son las puntas del vector de magnetización (modificado de Butler, 1992).

Comúnmente X representa al norte, $-X$ al sur, Y al Este y $-Y$ al Oeste. También se grafica la intensidad de la magnetización en función del campo aplicado, como se muestra en la Figura IV.4.

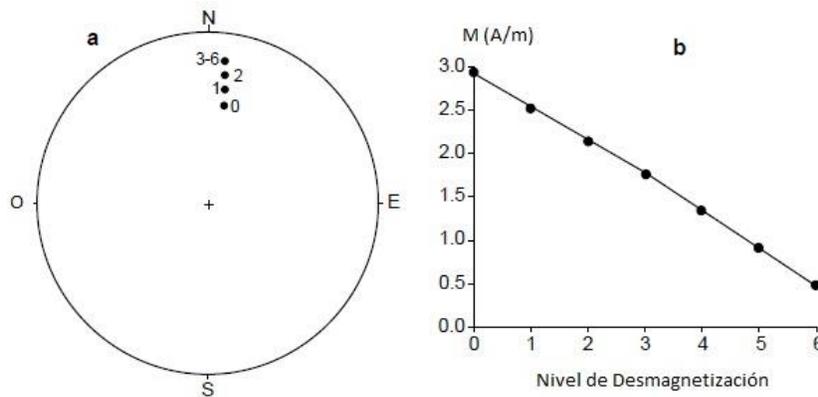


Figura IV.4 Muestra a) la proyección de igual-área donde los números indican el nivel de desmagnetización y se observa que del nivel 1 al 3 hay cambios notables pero del nivel 3 al 6 se mantiene casi constante. También muestra b) la grafica de la desmagnetización progresiva (modificado de Butler, 1992).

Cuando se realiza un lavado magnético pueden obtenerse tres tipos de espectros de coercitividad, el caso más simple donde la magnetización característica y la(s) secundaria(s) no se traslapan, y por tanto los diagramas de Zijderveld presentan un comportamiento lineal al origen en ambas componentes (Figura IV.5 a y b). En el

segundo caso, hay un traslape parcial por lo que el contacto entre ambas rectas se curva, sin embargo, pueden obtenerse dos líneas rectas con tendencia al origen (Figura IV.5 c y d). Por último, cuando hay un traslape total de las componente primaria y secundaria no es posible determinar las componentes de magnetización (Figura IV.5 e y f).

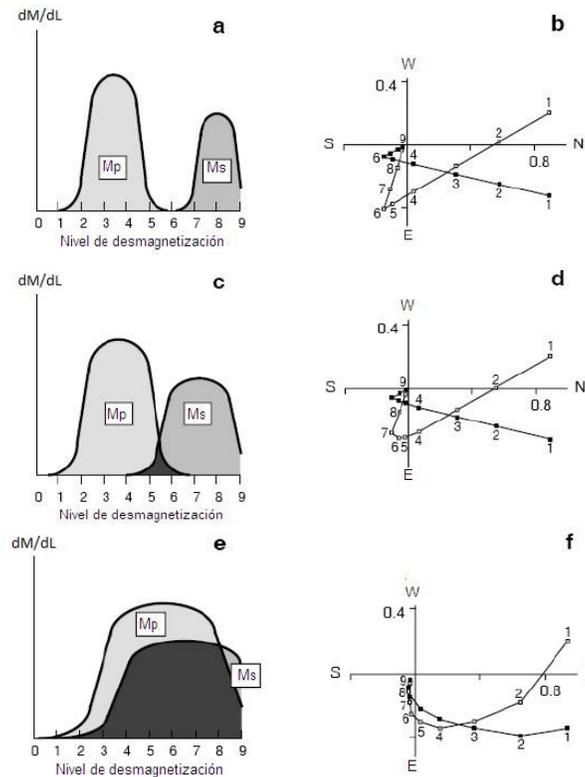


Figura IV.5 Muestra el espectro de coercitividad de la magnetización a) sin traslape, c) con traslape parcial, y e) con traslape total de las coercitvidades con su correspondiente diagrama de Zijderveld. Donde M_p es la magnetización principal y M_s la magnetización secundaria (modificado de Butler, 1992).

En los casos donde la magnetización primaria y secundaria están traslapadas se utilizan *los círculos de remagnetización*, este método consiste en observar a los vectores resultantes de M_p y M_s tras cada paso de desmagnetización, estas direcciones definirán un círculo en la red estereográfica (círculo de remagnetización), y la intersección de los círculos de varios especímenes ayudará a encontrar las componentes de la magnetización principal.

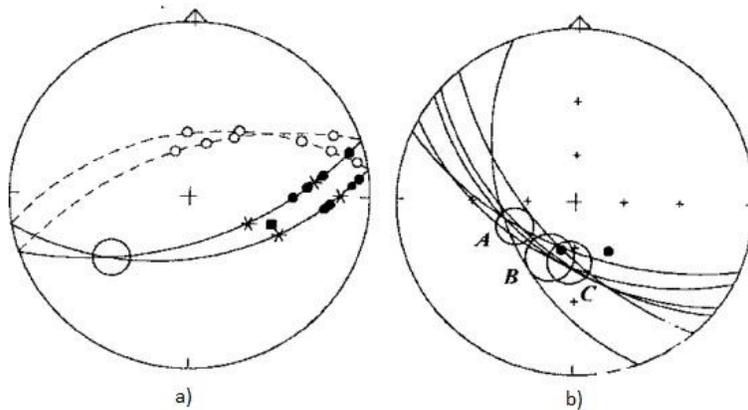


Figura IV.6 Muestra los círculos de remagnetización para determinar las componentes de la magnetización. En a) los puntos y asteriscos señalan los puntos de los vectores de magnetización que se traslapan y en b) los puntos A, B y C son los puntos que determinan la dirección de magnetización del espécimen (Soler-Arechalde, 2006)..

Cuando se ha realizado el lavado magnético de los especímenes y determinado a componente característica de cada uno, se vuelve a graficar en una red estereográfica y empleando la estadística de Fisher se obtiene su dirección media.

IV.6.1 Estadística de Fisher

La estadística más utilizada y sugerida para el análisis de datos paleomagnéticos es la de Fisher (Demarest, 1983).

La estadística de Fisher considera a los vectores de magnetización distribuidos en la superficie de una esfera unitaria y a cada dirección les asigna un peso unitario.

La función de densidad de Fisher $P_{dA}(\theta)$, da la probabilidad por unidad de área angular de encontrar una dirección dentro de esa área dA , y está dada por:

$$P_{dA}(\theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh \kappa} e^{\kappa \cos \theta} \dots (IV.9)$$

Donde θ es el ángulo a la dirección real y κ es el parámetro de precisión.

La dirección media puede expresarse por la Declinación media:

$$D = \tan^{-1} \frac{\sum_i m_i}{\sum_i l_i} \dots \text{(IV.10)}$$

La Inclinación media:

$$I = \frac{1}{R} \sin^{-1} \sum_i n_i \dots \text{(IV.11)}$$

Y la Magnitud:

$$R = \sqrt{\left(\sum_i l_i\right)^2 + \left(\sum_i m_i\right)^2 + \left(\sum_i n_i\right)^2} \dots \text{(IV.12)}$$

Donde l_i , m_i y n_i son los cosenos directores de la i -ésima dirección.

Fisher demostró que la estimación de la precisión está dado por.

$$\kappa = \frac{N - 1}{N - R} \dots \text{(IV.13)}$$

Donde N es el número de especímenes de la muestra. Cuando se conoce la dirección verdadera, la precisión es:

$$\kappa' = \frac{N}{N - R \cos \bar{\omega}} \dots \text{(IV.14)}$$

Donde $\bar{\omega}$ es el ángulo entre la dirección verdadera y las medias estimadas.

Una vez determinada la dirección media de la magnetización es necesario dar un límite de confianza, el cual se denomina α_{95} y está expresado por:

$$\cos \alpha_{(1-p)} = 1 - \frac{N - R}{N} \left[\left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right] \dots \text{(IV.15)}$$

Donde se ha establecido que $\kappa \geq 10$, $N \geq 10$ y $\alpha_{95} > 10$, para considerarse un buen ajuste.

IV.6.2 Estadística Bayesiana aplicada al Arqueomagnetismo

Para obtener las intersecciones de la dirección magnética principal de una muestra con la curva de Variación Secular se utiliza la Estadística Bayesiana aplicada a la Estadística de Fisher.

El método arqueomagnético a pesar de ser un método absoluto para realizar dataciones de sitios arqueológicos, presenta importantes errores experimentales debido a la poca uniformidad en la distribución de los datos tanto espacial como temporalmente, lo cual deriva en fluctuaciones en las dataciones con incertidumbres altas y en más de un intervalo. En 2004, Lanos desarrolló el programa REN-DATE (Lanos y Dufresne, 2008) el cual consiste en un modelo jerárquico basado en la inferencia Bayesiana para construir la curva de calibración y determinar la datación arqueomagnética, comparando la dirección principal de magnetización con la curva de referencia por periodos (ventanas de tiempo), es decir, se varía el tamaño de las ventanas de tiempo para comparar y calcular un promedio de las posibles intersecciones (Lanos et al., 2005). Después de realizar esta comparación, se obtienen dos curvas envolventes (declinación e inclinación) de la interpolación de las intersecciones posibles (Figura IV.7 y IV.8), donde a partir de la combinación de éstas dos y considerando el α_{95} se puede determinar en qué periodo de tiempo la dirección principal coincide con la del campo geomagnético en el pasado como se muestra en la Figura IV.9.

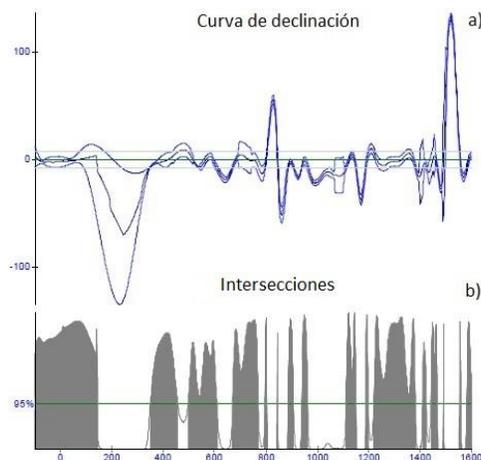


Figura IV.7 Muestra a) la gráfica de Declinación de la dirección magnética principal de una muestra con la curva de referencia y b) las intersecciones.

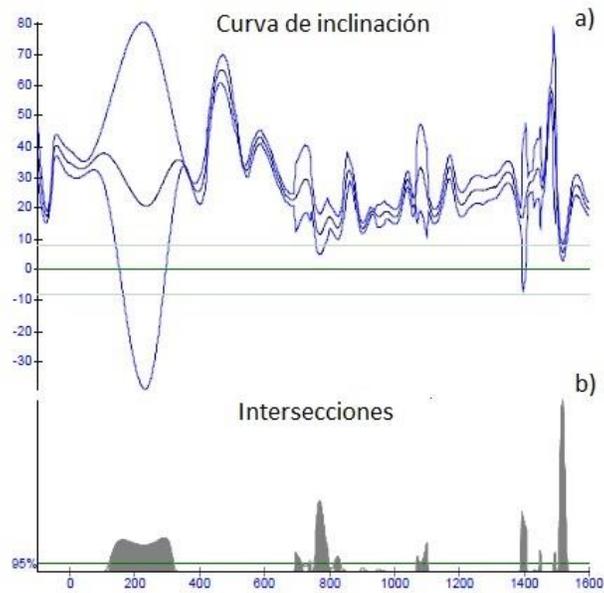


Figura IV.8 Muestra a) la gráfica de Inclinación de la dirección magnética principal de una muestra con la curva de referencia y b) las intersecciones.

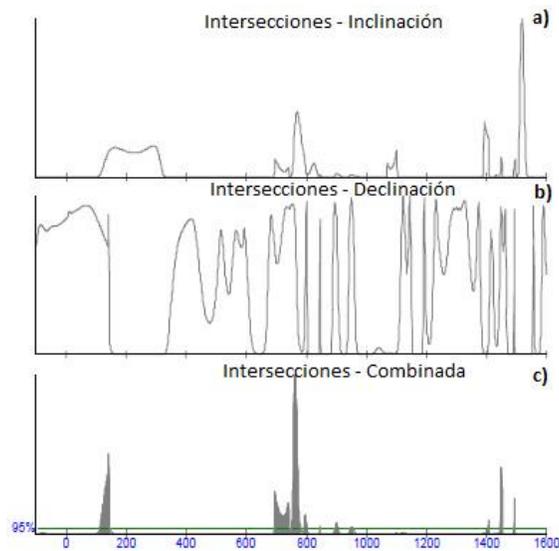


Figura IV.9 Muestra a) las intersecciones de la Declinación, b) las intersecciones de la Inclinación y c) las intersecciones de la Declinación e Inclinación.

Obtenidas las intersecciones de la Declinación y la Inclinación, se obtienen las posibles dataciones con un 95% de probabilidad, como se muestra en la Figura IV.10.

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

Figura IV.10 Muestra los intervalos de tiempo correspondientes a la doble intersección de Declinación e Inclinación

La estadística Bayesiana corrige las fluctuaciones debidas al número de especímenes de cada muestra. La precisión de la curva de intersección está dada por la estadística de elipses jerarquizadas en función del límite de confianza α_{95} . La estadística bayesiana consiste en aplicar el Teorema de Bayes a cualquier estadística, en este caso, a la estadística de Fisher, la cual determina el nivel de confianza de una dirección de magnetización comparada con una curva maestra de Variación Secular. La formulación matemática de la estadística de Bayes (1763) se muestra a continuación.

Teorema de Bayes. Sea $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ el conjunto de sucesos mutuamente excluyentes y exhaustivos, y tales que la probabilidad de cada uno de ellos es distinta de cero. Sea B un suceso cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales $P(B|A_i)$. Entonces, la probabilidad $P(A_i|B)$ viene dada por la expresión:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i) P(A_i)}{P(B)}$$

donde $P(A_i)$ son las probabilidades a prior, $P(B|A_i)$ es la probabilidad B en la hipótesis A_i y $P(A_i|B)$ son las probabilidades a posteriori.

Con base en la definición de Probabilidad condicionada se obtiene la Fórmula de Bayes, también conocida como la Regla de Bayes.

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i) P(A_i)}{\sum_{k=1}^n P(B|A_k) P(A_k)} \dots \text{(IV.16)}$$

Aplicando el Teorema de Bayes a Fisher, el factor de precisión κ se transforma a κ_B y se expresa como:

$$\frac{1}{\kappa_B} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\kappa_x} + \frac{1}{\kappa_y} \right) = \frac{m_i}{2} \left(\frac{W_{Ii} + W_{Di}}{W_{Ii}W_{Di} - W_{IDi}^2} \right) \dots \text{(IV.17)}$$

Donde κ_x y κ_y son las componentes x y y de κ , m_i es el número de sitios, y W es el factor de peso para la inclinación W_{Ii} , la declinación W_{Di} y sus combinaciones ($W_{Ii}, W_{Di}, W_{IDi}^2$).

Entonces la ecuación IV.9 se convierte en una función de densidad de probabilidad bayesiana aplicada a la estadística de Fisher.

$$P(\theta, \varphi) \approx \frac{\kappa_B}{4\pi \sinh \kappa_B} e^{(\kappa_B \cos \theta)(\sin \theta)} \dots \text{(IV.18)}$$

Bajo la suposición de que la estadística de Fisher es muy parecida a la función de distribución Gaussiana bivariada, entonces se obtiene un factor de concentración de direcciones suficientemente grande y las varianzas de los niveles de jerarquización pueden ser remplazados por los factores de concentración bayesianos.

El límite confianza α_{95} es estimado por:

$$\alpha_{95i} = \frac{t_{\beta F}}{\sqrt{m_i \kappa_{BO}}} = \frac{t_{\beta F}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m_i} \frac{1}{\frac{1}{\kappa_i} + \frac{1}{r_{ij} \kappa_{ij}}}}} \dots \text{(IV.19)}$$

Donde $t_{\beta F}$ es el factor de confianza para la estadística de Fisher con probabilidad $\beta = 0.05$ de que se concentren los resultados esperados en función de los sitios disponibles m_i , κ_{BO} es el factor de concentración bayesiano en el caso particular en que todos los sitios tengan la misma fecha (i.e. $P_{ij} = 1$ y $\sigma_{ti}^2 = 0$, entonces $W_{IDi} = 0$), y r_{ij} es el número de muestras disponibles en un sitio.

El número de especímenes n_{ij} de una muestra es adecuado si se encuentra entre 10 y 30, ya que el factor de confianza se mantiene casi constante aunque se

aumente el número de especímenes. Este comportamiento también se observa para el número de muestras r_{ij} y de sitios m_{ij} , como se observa en la siguiente tabla.

Tabla IV.1 Valores del coeficiente de confiabilidad Bayesiano para Fisher (modificado de Lanos, 2005).

| Número de especímenes, muestras o sitios n_{ij}, r_{ij}, m_{ij} | Factor de confianza $t_{\beta F}$ |
|--|--------------------------------------|
| 2 | 6.16 |
| 3 | 3.73 |
| 4 | 3.21 |
| 5 | 2.99 |
| 6 | 2.86 |
| 7 | 2.79 |
| 8 | 2.73 |
| 9 | 2.70 |
| 10 | 2.67 |
| 30 | 2.51 |
| 100 | 2.47 |
| ∞ | 2.45 |

IV.7 Datación Arqueomagnética

La datación Arqueomagnética se basa en la comparación de la magnetización característica de la muestra con la curva de variación secular correspondiente.

En nuestro caso se utilizó el programa Ren-Date (Lanos y Dufresne, 2008) que hace uso de la Estadística Bayesiana para obtener las intersecciones de la dirección de la muestra con la curva de Variación Secular.

Los puntos de coincidencia corresponden a las dataciones más probables, las cuales son presentadas al especialista, en este caso, al arqueólogo encargado del proyecto arqueológico del sitio para que seleccione las más probables.

IV.8 La Curva de Variación Secular y el Programa REN-DATE

La curva de variación secular para Mesoamérica se ha ido construyendo con los datos obtenidos de varios trabajos de investigación. El primero en construir dicha curva fue Wolfman en 1973, quien recolectó 78 muestras de 14 sitios arqueológicos en México, Guatemala, Honduras y El Salvador (Wolfman, 1973). Dado que eran estucos quemados presentaban un buen agrupamiento por lo que solo a 14 se les realizó un lavado magnético para obtener 64 dataciones Arqueomagnéticas. En el 2000, Hueda obtuvo 58 muestras de sitios del centro de México y para realizar las dataciones construyeron una curva de referencia que incluía las dataciones de Wolfman (1990) mostrados en la Figura IV.11, Latham et. al. (1986) y datos de rocas volcánicas. A la curva de variación secular se le han ido incluyendo nuevos datos de Guerrero (2003), Romero (2008), Sánchez y Rodríguez en Soler et al (2006). López-Delgado (2010), Saavedra (2010), Fregoso (2010), Aguilar y Morales (2011) Martínez-Miranda (2012), Tesis en Arqueología, Física y del Posgrado en Ciencias de la Tierra (Soler-Arechalde, 2014).

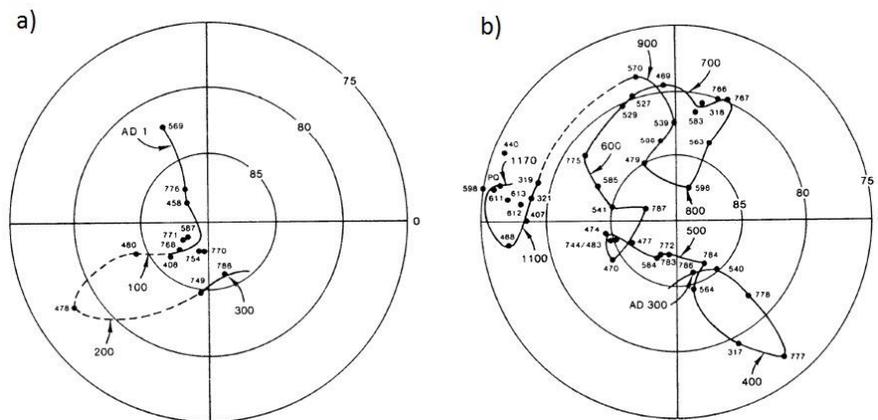


Figura IV.11 Curva de Variación Secular para Mesoamérica (Wolfman,1990). Se muestra a) la variación del 1 al 300 d.C. y b) la variación del 300 al 1200 d.C.

Así como se han ingresado un número considerable de nuevos datos en la curva de variación secular, el programa REN-DATE de Lanos (2004) introdujo el uso de la estadística Bayesiana para seleccionar las dataciones más probables.

La curva actual está modelada mediante esplines cúbicos de un modelo jerárquico y ventana móvil para el promedio de los polos (Lanos, 2005). Como ya se

mencionó, el programa REN-DATE (Lanos, 2004 y 2008) utiliza el teorema de Bayes para obtener los intervalos de mayor probabilidad con un 95% de confianza.

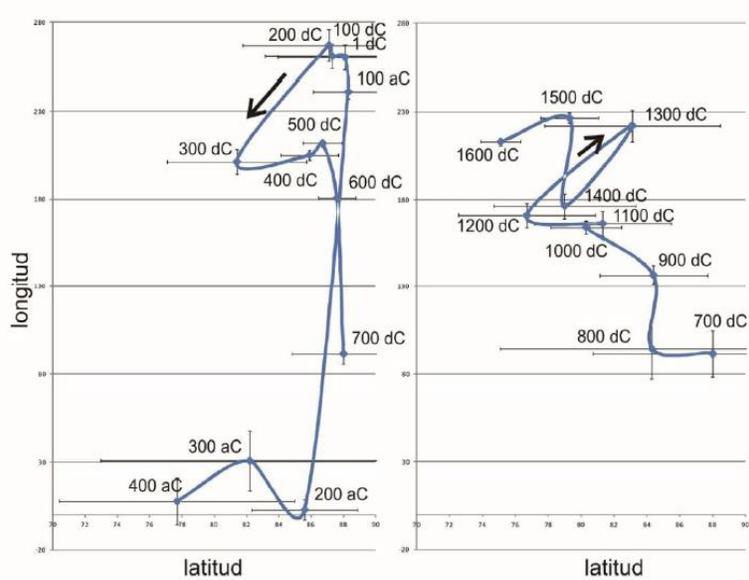


Figura IV.12 Curva de Variación Secular para Mesoamérica VPG construida con datos arqueomagnéticos de Wolfman y del Laboratorio de Paleomagnetismo de la UNAM del año 2000 al 2013 (Soler-Arechalde, 2014).

La curva de variación direccional fue construida con una ventana de 100 años para polos recientes, esto para promediar las variaciones del campo no dipolar (Figura IV.13).

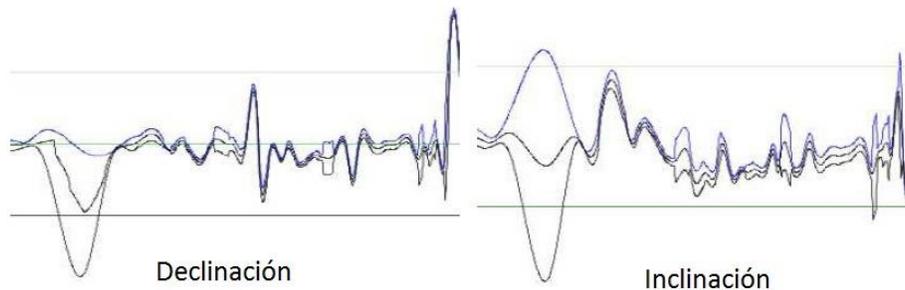


Figura IV.13 Curva de Variación Secular direccional para Mesoamérica anexada al programa REN-DATE de Lanos (Soler-Arechalde, 2006).

Sin embargo, aún hay intervalos con pocos datos por lo que es necesario recolectar un mayor número de muestras en diferentes regiones así como también de distintas temporalidades.

IV.8.1 Modelos Globales de Variación Paleosecular

En la actualidad, los Modelos Globales de Variación han tomado un papel importante ya que es necesario un marco de referencia para los datos obtenidos experimentalmente. Estos modelos matemáticos se construyen a partir de un gran conjunto de dataciones arqueomagnéticas y paleomagnéticas.

En 2000, Constable y colaboradores (Constable et al, 2000) diseñaron el primer modelo global PSVMOD1.0 el cual incluía datos de arqueomagnetismo y sedimentos de lagos. En 2003, el modelo CALS3k.1 se incluyeron datos de series de fechas volcánicas al modelo anterior. Fue hasta 2005 que Korte y Constable diseñaron un nuevo modelo, el CALS7K.1 (Korte y Constable, 2003) que incluyó datos de intensidad del campo y además ampliaron la ventana de tiempo para los últimos 7 mil años, este modelo fue mejorado con la segunda versión que podía predecir la dirección e intensidad del campo geomagnético futuro (Korte y Constable, 2008).

Al modelo ARCH3k (Donadini et al, 2009) se le realizó una comparación entre cinco diferentes modelos globales (ARCH3k.1, ARCH3k_cst.1, SED3k.1, CALS3K.1, CALS3k.3 y CALS7K.2) para determinar cuál era el modelo más eficiente, siendo el CALS3k.3 la mejor representación del campo geomagnético pasado. Sin embargo, el modelo ARCH3k (Donadini et al., 2009) contiene datos arqueomagnéticos y de lavas con los requerimientos de calidad probados para los últimos 4000 años, además de contener más datos en el hemisferio norte, por lo que es el modelo global adecuado para comparar las dataciones obtenidas durante el procedimiento experimental de esta Tesis.

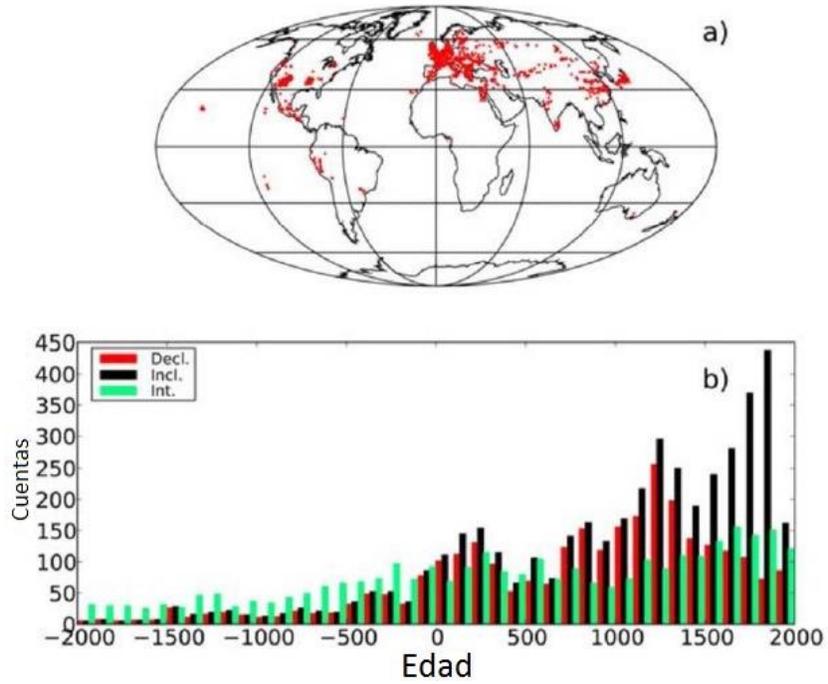


Figura IV.14 Características del modelo ARCH3k (Donadini et al., 2009). Muestra a) la distribución de las muestras arqueológicas y las lavas consideradas en el modelo y b) la distribución temporal de inclinación, declinación e intensidad de los datos.

Capítulo V

Metodología Experimental

V.1 Introducción

Durante este capítulo se describirá a detalle la metodología experimental desarrollada para realizar la datación Arqueomagnética de Ndachjian Tehuacán.

V.2 Toma de Muestras

El muestreo se realizó en el sitio arqueológico de Ndachjian Tehuacán por la Dra. Ana María Soler Arechalde en la primer temporada en 2015 donde se obtuvieron ocho muestras y la segunda temporada que se realizó en conjunto, en el año de 2016 donde se obtuvieron cinco muestras más.

Las muestras pueden ser de bloque o especímenes individuales, cada uno de ellos orientado mediante una brújula. El bloque debe de tener una dimensión de al menos 10 x 10 cm, para poder extraer entre 8 y 15 especímenes individuales. Cada espécimen debe tener una forma cilíndrica circular recta de 2.54 cm de diámetro y 2.10 cm de alto. Es necesario notar que para obtener esta forma geométrica se utilizan testigos cilíndricos de madera (2.54 cm de diámetro y 0.5

cm de alto), los cuales se pegan sobre la superficie arqueológica con una resina epóxica libre de material magnético.

A continuación se muestra la localización de las muestras obtenidas en el sitio que corresponden a la Tabla V.1 (Fig. V.1).

Tabla V.1 Exhibe las muestras obtenidas con sus correspondientes especímenes y el tipo de estructura que se pretende datar.

| Muestra | Número de Especímenes | Tipo de estructura Arqueológica |
|----------------|------------------------------|---|
| TC1 | 10 | Pilar 7 de la Sala con Pilares (etapa IV A) |
| TC2 | 12 | Pilar 7 de la Sala con Pilares (etapa IV B) |
| TC3 | 11 | Piso Inferior de la Sala con Columnas del Conjunto Central (etapa IV A) |
| TC4 | 7 | Piso Superior de la Sala con Columnas del Conjunto Central (etapa IV B) |
| TC5 | 9 | Muro del Templo Mayor (etapa IV B) |
| TC6 | 12 | Arriba de Templo Mayor (etapa III) |
| TC7 | 12 | Estructura 4 del Conjunto I de la Plaza C (etapa IV A) |
| TC8 | 9 | Muro norte de la estructura 4 del conjunto I de la Plaza C (etapa III) |
| TC9 | 16 | Pilar 10 de la Sala con Pilares (etapa IV B) |
| TC10 | 12 | Sala con Columnas (etapa IV B) |
| TC11-A | 12 | Muro norte (etapa IV A) |
| TC11-B | 9 | Muro norte (etapa IV A) |
| TC12 | 11 | Muro norte (etapa IV B) |

Se muestra la localización de las muestras obtenidas en el sitio que corresponden a la Tabla V.1.

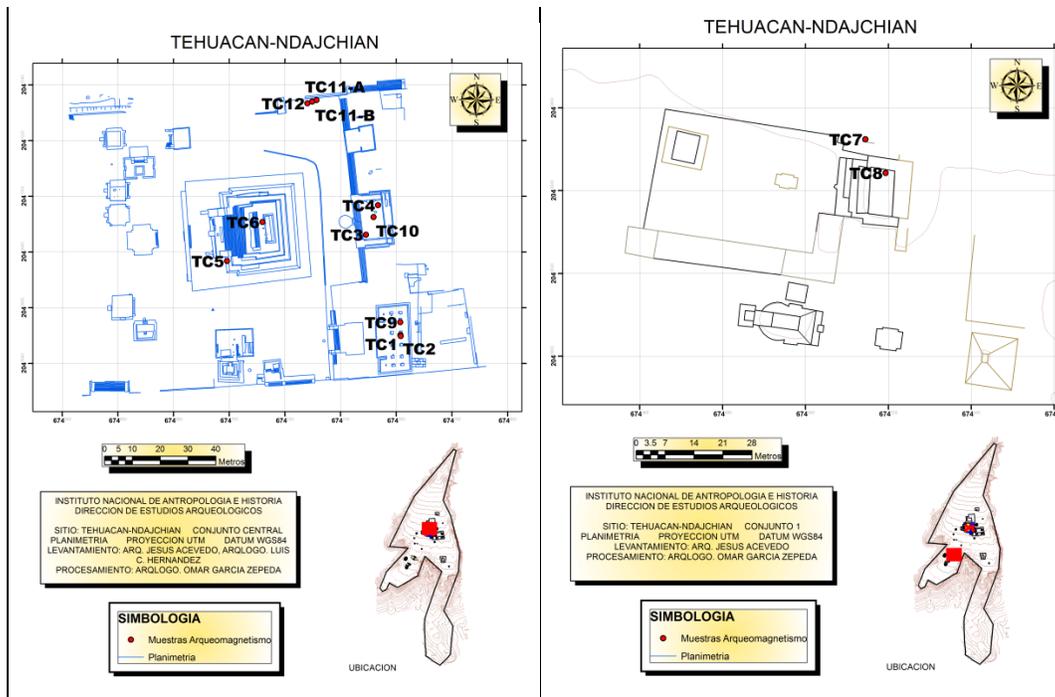


Figura V.1 Exhibe la localización de las muestras en el sitio Arqueológico.

En las siguientes figuras se observan las estructuras arqueológicas de las que se obtuvieron las muestras y el proceso de orientación y marcado.



Figura V.2 Muestra TC1 extraída del Pilar 7 de la Sala con Pilares (etapa IV A).



Figura V.3 Muestra TC2 extraída del Pilar 7 de la Sala con Pilares (etapa IV B).



Figura V.4 Muestras TC3 y TC4 extraídas del Piso Inferior de la Sala con Columnas del Conjunto Central (etapa IV A) y del Piso Superior de la Sala con Columnas del Conjunto Central (etapa IV B) respectivamente.



Figura V.5 Muestra TC5 extraída del Muro del Templo Mayor (etapa IV B).



Figura V.6 Muestra TC6 extraída de Arriba del Templo Mayor (etapa III).



Figura V.7 Muestra TC7 extraída de la estructura 4 del Conjunto I Plaza C (etapa IV A).



Figura V.8 Muestra TC8 extraída del Muro norte de la estructura 4 conjunto I Plaza C (etapa III).



Figura V.9 Muestra TC9 extraída del Pilar 10 de la Sala con Pilares (etapa IV B).



Figura V.10 Muestra TC10 extraída de la Sala con Columnas (etapa VI B).



Figura V.11 Muestra TC11-A extraída del Muro norte (etapa IV A).



Figura V.12 Muestra TC11-B extraída del Muro norte (etapa IV A).



Figura V.13 Muestra TC11-A extraída del Muro norte (etapa IV B).

Como puede observarse algunas de las muestras son bloques y en otros casos, se empleo el método de testigos de madera, los cuales son adheridos con pegamento epóxico y cada uno de ellos es orientado de manera individual. Una vez que las muestras o los especímenes se orientaron, se procede a extraerlas con ayuda de cinceles y martillos no magnéticos y empaquetarlas para su transporte.

V.3 Procesamiento de muestras Arqueomagnéticas

V.3.1 Preparación de especímenes

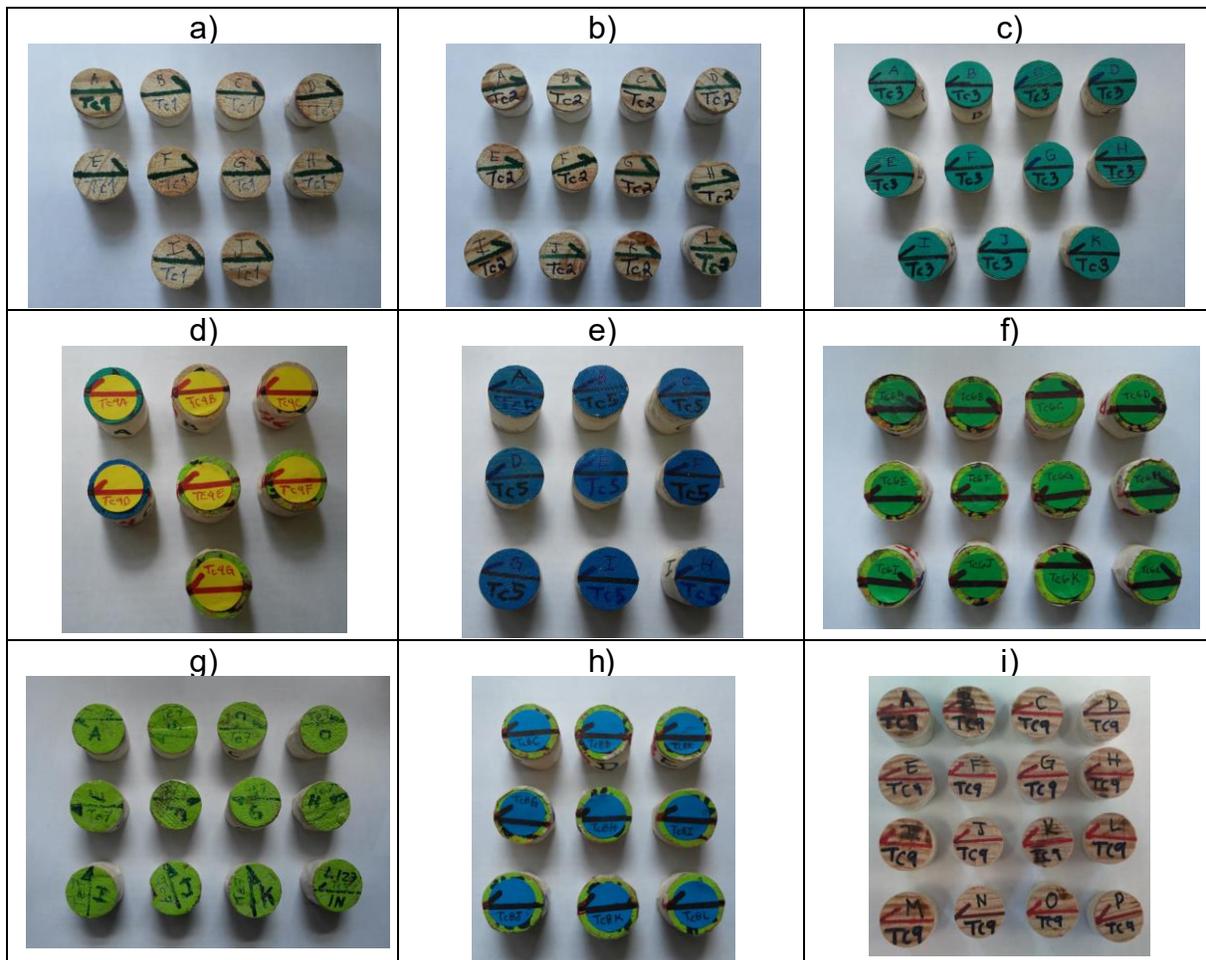
Como se ha mencionado, para cada muestra se tiene un número determinado de especímenes y a cada uno de ellos se les dio un tratamiento previo para obtener la forma geométrica deseada.

Sí la muestra fue obtenida mediante especímenes individuales, se les procesa para obtener las dimensiones deseadas; sí la muestra es un bloque de estuco entonces en el laboratorio se adhieren los testigos y se cortan con un mototool para que se obtengan las dimensiones necesarias. Enseguida, cada espécimen se envuelve en cinta adhesiva y en caso necesario se rellena con cerámica moldeable no magnética para obtener la forma cilíndrica circular recta, como se muestra en la siguiente figura.



Figura V.14 Exhibe la preparación de especímenes.

Si se observa que el material arqueológico adherido a la tapa de madera es poco, se debe colocar otra tapa en la parte inferior para que tenga las dimensiones requeridas por el portamuestras del magnetómetro de Giro AGICO JR6.



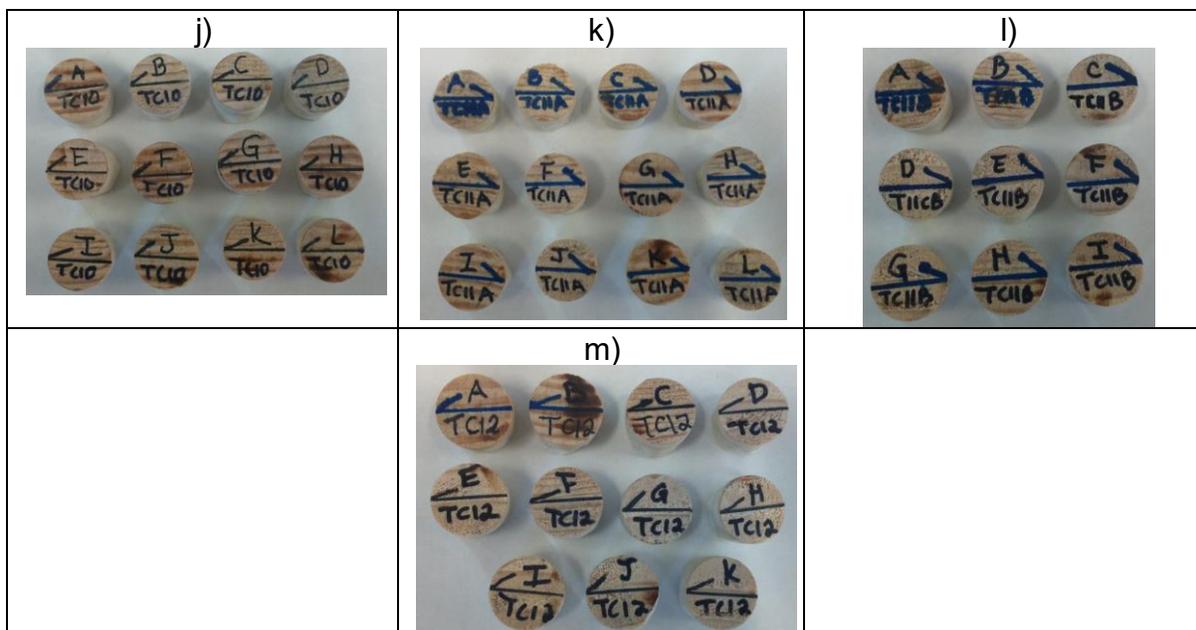


Figura V.15 Fotografía de los especímenes a) TC1, b) TC2, c) TC3, d) TC4, e) TC5, f) TC6, g) TC7, h) TC8, i) TC9, j) TC10, k) TC11A, l) TC11B y m) TC12 de las muestras después de su preparación.

V.3.2 Medición de muestras Arqueomagnéticas

Una vez preparados los especímenes, éstos son guardados en un blindaje magnético por tres semanas para eliminar las magnetizaciones viscosas, después se procede a medir su Magnetización Remanente Natural (NRM) con el Magnetómetro JR6 que cuenta con una sensibilidad de $10^{-10} Am^2$, como se muestra en la Figura V.16. Este tipo de magnetómetro mide la oscilación del campo magnético del espécimen debido a la rotación de la misma.

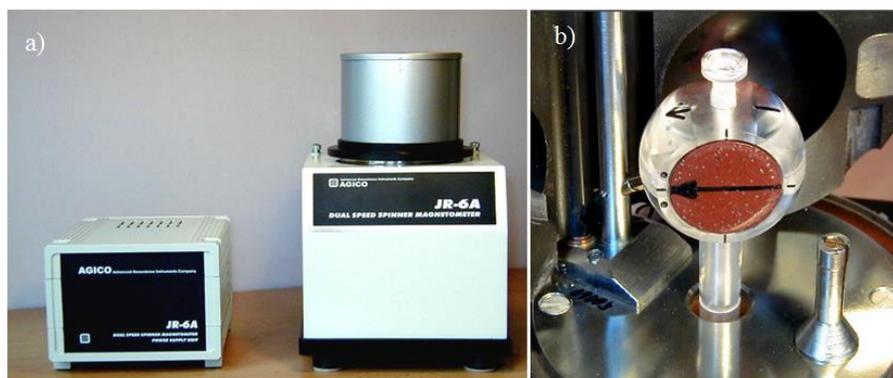


Figura V.16 Exhibe a) el Magnetómetro de Giro AGICO JR6 y b) el portamuestras.

Mediante el programa REMA6, el magnetómetro JR6 determina el momento magnético (M_x, M_y, M_z) del espécimen en coordenadas de la muestra, estos datos son transformados a las componentes del campo magnético (D, I, M), y del mismo modo pueden calcular correcciones geográficas y estructurales.

Cuando a todas las muestras se les ha medido su NRM, se seleccionan algunos especímenes denominados pilotos para efectuárseles el lavado magnético, en nuestro caso mediante campos alternos crecientes dado que no pueden ser calentados por la madera que se les adhiere.

Para definir la magnetización primaria o característica se realiza un lavado magnético utilizando un Desmagnetizador de Campos Alternos marca MOLSPIN. La Desmagnetización por Campo Alternos consiste en aplicar un campo externo débil en un rango de intensidad de 2.5 mT a 100 mT en intervalos predefinidos (2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 mT), y entre cada paso de desmagnetización se mide la magnetización remanente del espécimen en el magnetómetro.

Con los datos obtenidos y a través del uso del programa Remasoft 3.0 (Chadima y Hrouda, 2006) se obtuvo la red estereográfica, el diagrama de Zijderveld y el espectro de desmagnetización de cada espécimen a partir de los archivos obtenidos con el equipo JR-6 de AGICO, en el capítulo VI se exhibirán algunos especímenes y todos los especímenes procesados están contenidos en el Anexo B.

V.3.3 Determinación de la Dirección Magnética y Datación

Después de determinar la magnetización característica de los especímenes y con el uso de la estadística de Fisher se obtuvo la dirección magnética media de las muestras aceptadas. En seguida, se empleó el programa REN-DATE (Lanos y Dufresne, 2008) para obtener las intersecciones con la Curva de Variación Secular para Teotihuacán (Modificado de Soler et al., 2006) y así, obtener probables dataciones.

V.4 Estudios Complementarios

Los estudios magnéticos que se realizaron tienen como finalidad caracterizar la magnetización de las muestras. Las pruebas efectuadas fueron: i) determinación de la *Susceptibilidad Magnética*, ii) medición de la *Anisotropía de Susceptibilidad Magnética* para determinar el tipo de fábrica magnética e inferir el tipo de depósito, iii) el *Ciclo de Histéresis* y espectros de saturación para identificar el tipo Dominio Magnético en micromuestras.

También se hicieron estudios de *Fluorescencia de Rayos X* para determinar los elementos traza de cada muestra.

V.4.1 Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS)

La Susceptibilidad Magnética y la Anisotropía se midieron en un Susceptibilímetro Kappabridge KLY-2, como se muestra en la Figura V.17.



Figura V.17 Exhibe el Susceptibilímetro Kappabridge KLY-2 donde se realizaron las mediciones de Susceptibilidad Magnética y Anisotropía de Susceptibilidad Magnética.

Posteriormente se midió la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS) el mismo susceptibilímetro Kappabridges KLY-2, el cual emplea 15 direcciones.

La AMS tiene como objetivo describir como están organizados los portadores de información magnética dentro del material arqueológico, la siguiente tabla muestra el tipo de fábrica magnética se trata.

V.4.2 Ciclo de Histéresis y Magnetización Remanente Isotérmica (IRM)

Los Ciclos de Histéresis y las pruebas de IRM se midieron en un MicroMag de Princeton Measurements. Se necesita una micromuestra de 50 mg, la cual fue sometida a una oscilación mecánica generada por la presencia extra al espécimen. La oscilación del espécimen es proporcional a su momento magnético original, esta oscilación es detectada por un cristal piezoeléctrico que transforma el movimiento mecánico a un potencial.

V.4.2.1 Diagrama de Day

Tal como se describió en el **Capítulo IV**, se obtienen los parámetros de magnetización de saturación (M_S), saturación de remanencia (M_{RS}) y coercitividad (H_C) del ciclo de Histéresis y el parámetro de coercitividad de remanencia (H_{CR}) de la IRM, se puede obtener el diagrama de Day (Day et al., 1977) en función de los cocientes de M_{RS}/M_S y H_{CR}/H_C .

V.4.3 Espectroscopia por Fluorescencia de Rayos X (XRF)

El análisis de la composición elemental se realizó con el uso del equipo XRF SANDRA (Sistema de Análisis No Destructivo por Rayos X) del Instituto de Física de la UNAM (Ruvalcaba *et al.*, 2010).

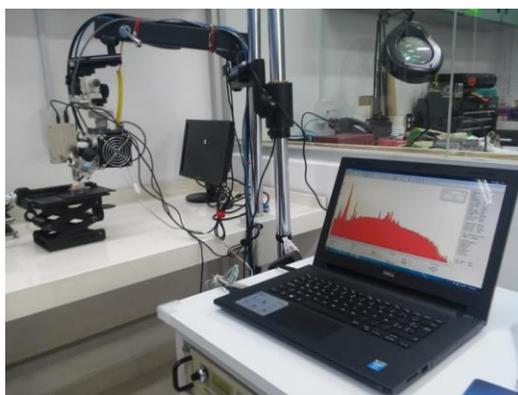


Figura V.18 Muestra el equipo SANDRA empleado en la espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X del IF-UNAM.

Se seleccionaron entre uno y dos trozos pequeños (~1cm) de cada una de las 13 muestras recolectadas, enseguida se eligieron zonas específicas con diferente coloración. Para el análisis de las muestras, se irradio con un haz de rayos X de Molibdeno (Mo) de 1mm de diámetro con un potencial de 35 kV y 0.3 mA en el tubo durante 90 segundos. Se empleó un detector Si-PIN Amptek a 45° del haz primario de Rayos X y normal a la superficie de la muestra.

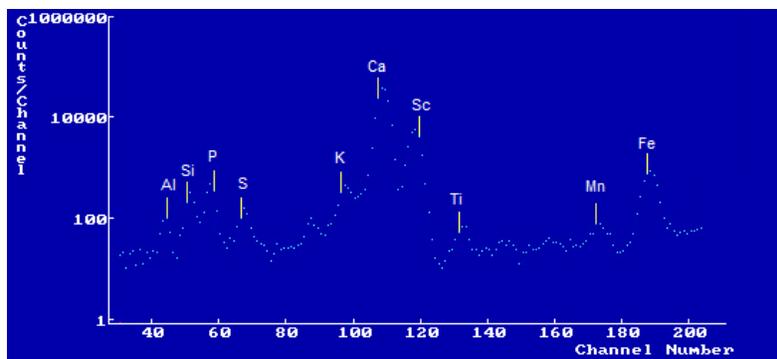


Figura V.19 Espectro típico de Fluorescencia de Rayos X, obtenido por SANDRA del IF-UNAM.

Para realizar el análisis cuantitativo se irradiaron bajo las mismas condiciones materiales de referencia certificadas de Roca y Minerales en polvo del National Institute for Standards and Technology (NIST): SRM 1d (piedra caliza, arcilla) y SRM IGLgb-3 (sienitas). Debido a que los espectros deben ser de concentraciones similares, se seleccionaron algunos para los materiales de referencia SMR 1d y otras para SRM IGLgb-3 independientemente de la muestra.

La intensidad de rayos X de los elementos detectados en las muestras se cuantificó con el uso del programa AXIL (Vekemans *et al.*, 1994) y el análisis para obtener las concentraciones elementales se realizó siguiendo el procedimiento descrito por Rousseau *et al.* (1996). Los resultados obtenidos son mostrados en el Capítulo VI.

Capítulo VI

Resultados

VI.1 Determinación de la Dirección Magnética Principal

Primero se midió el NRM de los especímenes y se graficó para determinar el comportamiento de las muestras, para enseguida poder elegir a las muestras apropiadas para ser procesadas.

Tabla VI.1 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC1.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|---------|----------------------------------|--|
| TC1 | | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales y reversas.</p> <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes A, D y H para determinar si tendían a una dirección preferencial, sin embargo, en las proyecciones estereográficas se presentaron direcciones normales y reversas (Tabla 1 del Anexo A).</p> <p>La muestra se descartó debido a la gran dispersión y a que los especímenes desmagnetizados presentan direcciones normales y reversas por lo que no corresponden a temporalidad del sitio.</p> |

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC1

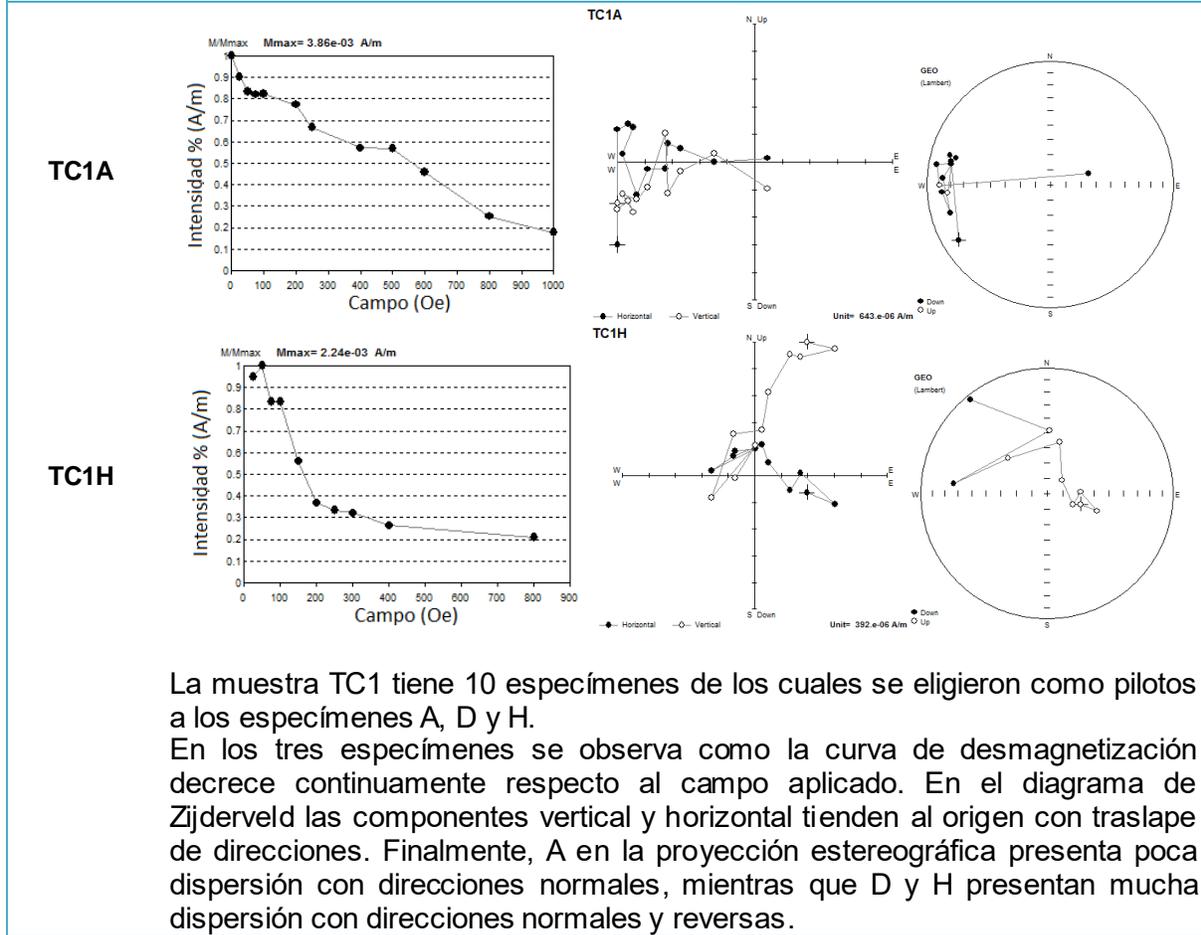


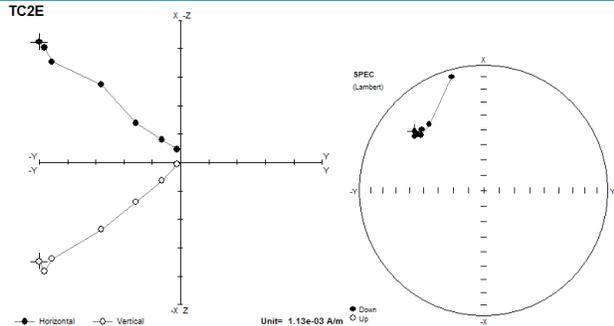
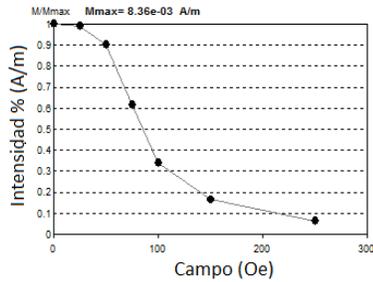
Tabla VI.2 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC2.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|------------|----------------------------------|--|
| TC2 | | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales y reversas.</p> <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes E, G, H, I, J y L para determinar si tendían a una dirección preferencial, de los cuales obtuvimos que el espécimen E y L tendían a una dirección preferencial, mientras que G, H, I y J presentaban direcciones normales y reversas (Tabla 2 del Anexo A).</p> <p>Dados los resultados, se decidió aplicar la estadística de Fisher a la</p> |

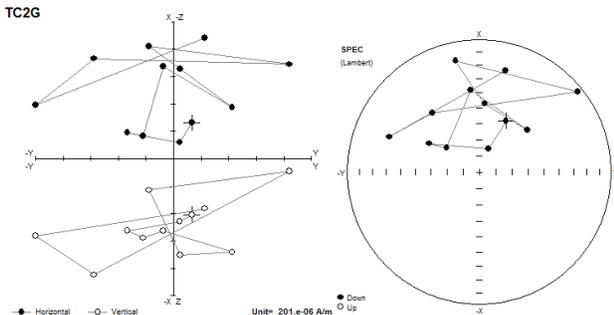
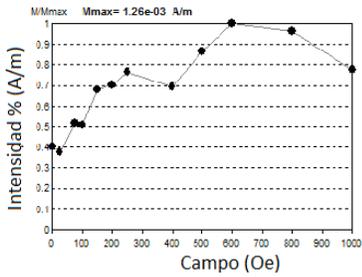
muestra a pesar de la gran dispersión, esto se justifica ya que es una muestra no quemada.

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC2

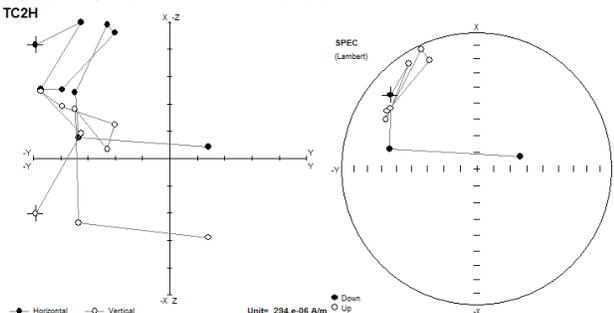
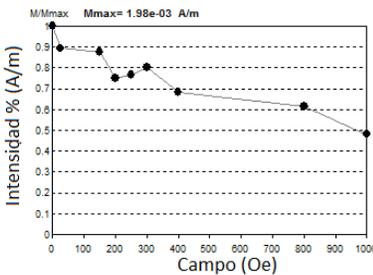
TC2E



TC2G



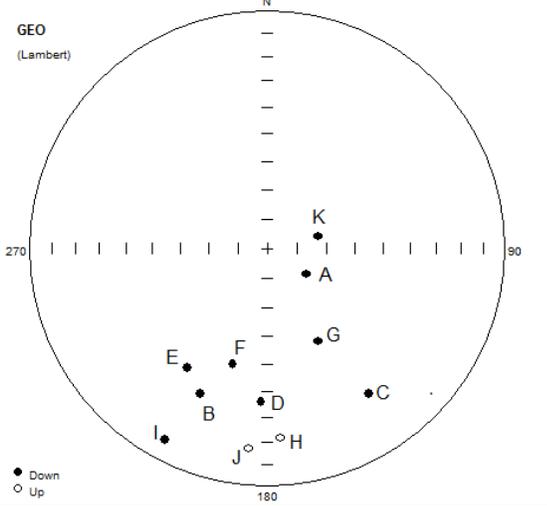
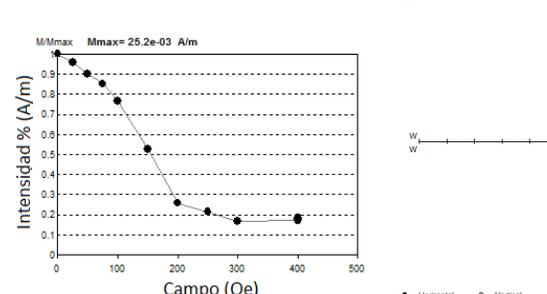
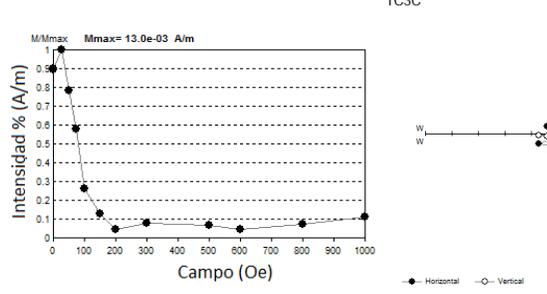
TC2H



La muestra TC2 tiene 12 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes E, G, H, I, J y L.

En E, H, J y L se observa como la curva de desmagnetización decrece continuamente respecto al campo aplicado, mientras que el campo crece en G e I. En el diagrama de Zijderveld los especímenes E y L, las componentes vertical y horizontal tienden al origen sin traslape de direcciones, mientras que los especímenes G, H, I y J presentan traslape de direcciones. Por último, en la proyección estereográfica E y L presentan poca dispersión con direcciones normales, mientras que los demás especímenes presentan mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

Tabla VI.3 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC3.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|--|---|--|
| TC3 |  | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales y reversas.</p> <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes A, B, C, D y F para determinar si tendían a una dirección preferencial. F y C presentan direcciones normales y reversas (Tabla 3 del Anexo A).</p> <p>La muestra se descartó ya que la dirección preferencial de los especímenes A, B, y D corresponde a otra temporalidad.</p> |
| Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC3 | | |
| TC3A |  | |
| TC3C |  | |

La muestra TC3 tiene 11 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes A, B, C, D y F.

Se observa en todos los especímenes como la curva de desmagnetización decrece continuamente respecto al campo aplicado. En el diagrama de Zijdeveld las componentes vertical y horizontal tienden al origen con traslape de direcciones en todos los especímenes. Mientras que en la proyección estereográfica, los especímenes A, B y D presentan poca dispersión con direcciones normales y, C y F presentan mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

Tabla VI.4 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC4.

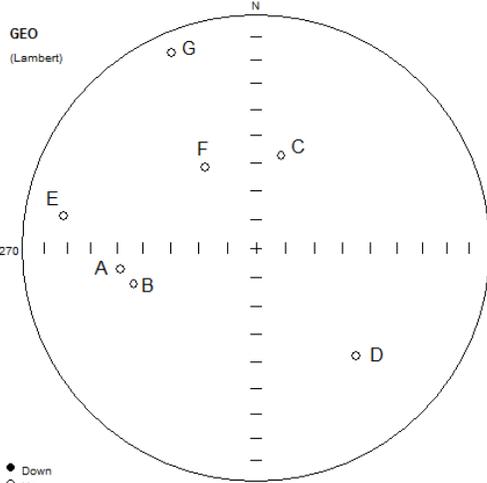
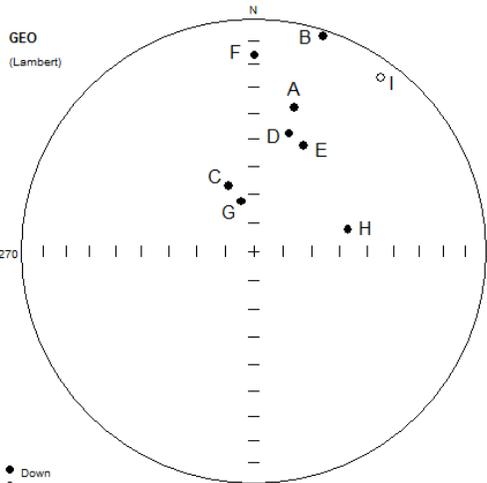
| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|--|---|--|
| <p>TC4</p> |  | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones reversas.</p> <p>La muestra se descartó ya que la presencia de direcciones reversas no corresponde a la temporalidad del sitio.</p> |
| <p>Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC4</p> | | |
| <p>La muestra TC4 tiene 7 especímenes de los cuales no se eligió a ninguno como piloto debido a que presenta una gran dispersión con direcciones reversas.</p> | | |

Tabla VI.5 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC5.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|-------------------|---|---|
| <p>TC5</p> |  | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales y reversas.</p> <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes A, C, D, E, F, G, H e I para determinar si tendían a una dirección preferencial. A, C, F e I presentan direcciones normales y reversas (Tabla 4 del Anexo A).</p> <p>La muestra se descartó ya que la dirección preferencial de los especímenes B, D, E, G y H corresponden a otra temporalidad.</p> |

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC5

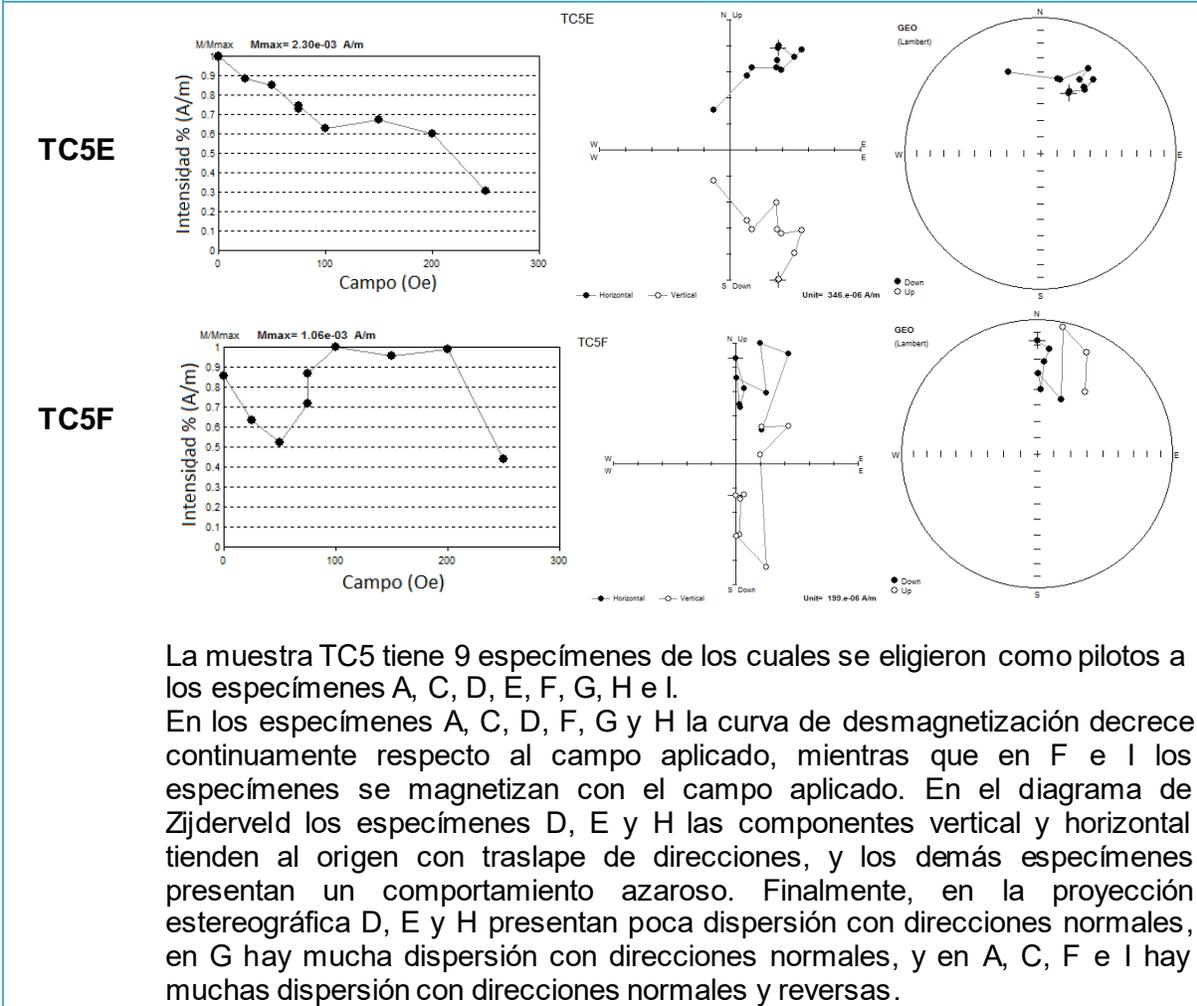
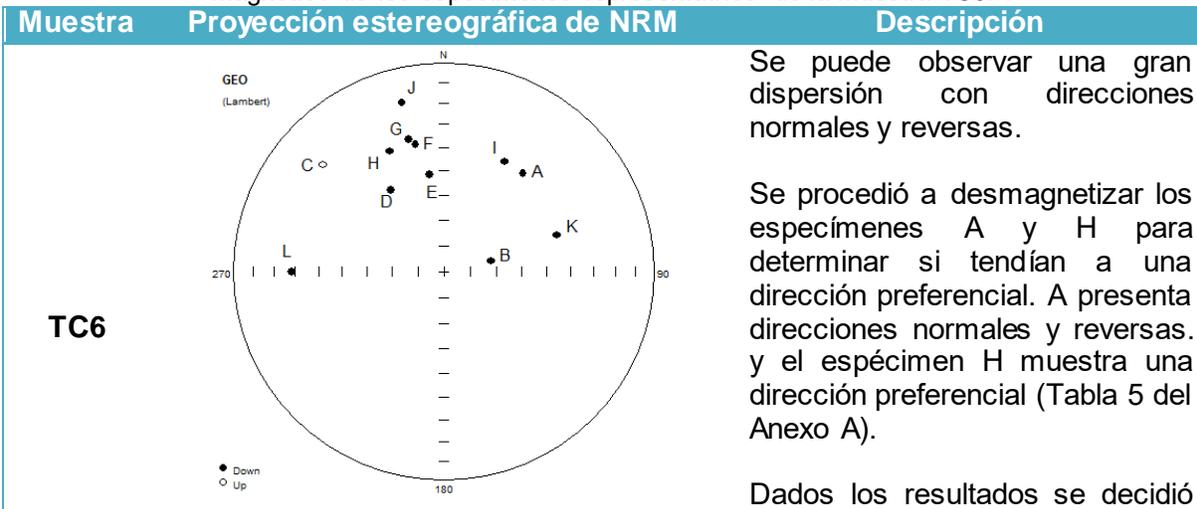


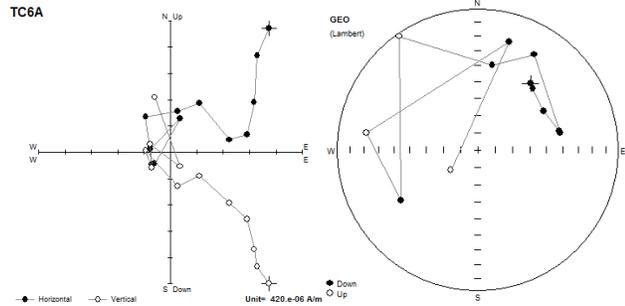
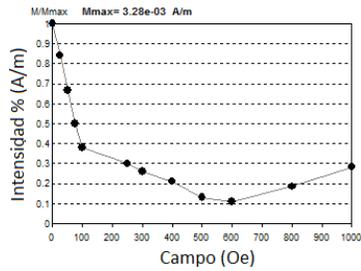
Tabla VI.6 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC6.



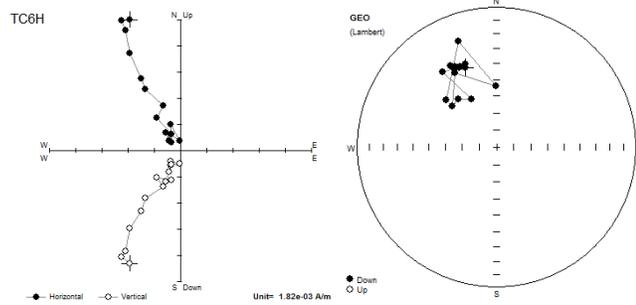
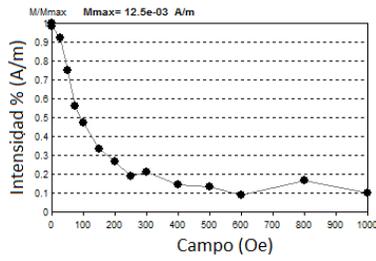
aplicar la estadística de Fisher a la muestra a pesar de la gran dispersión que presenta, esto se justifica ya que es una muestra no quemada.

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC6

TC6A



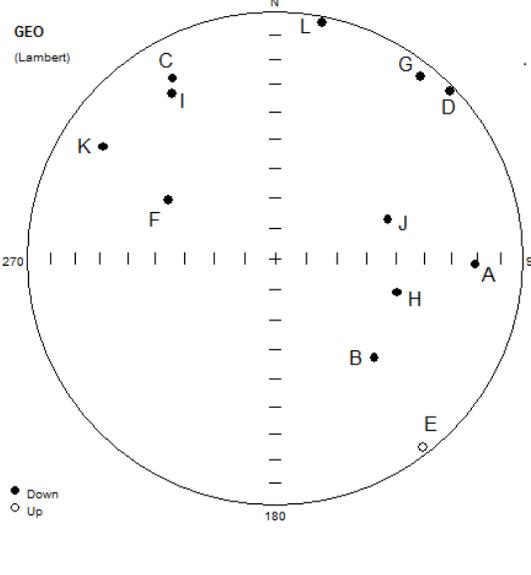
TC6H



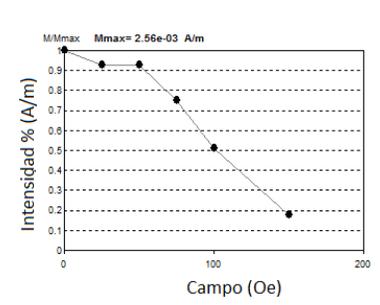
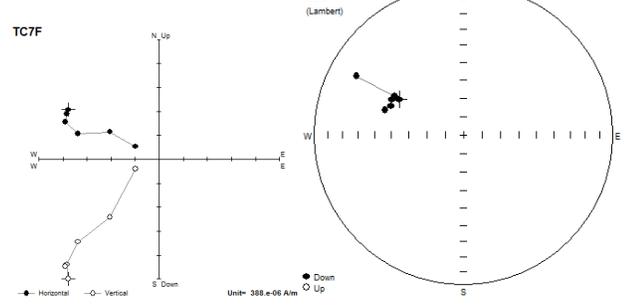
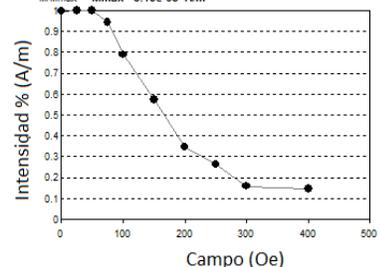
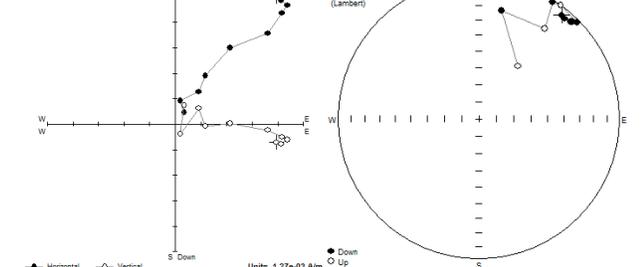
La muestra TC6 tiene 12 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes A y H.

Se observa en los dos especímenes como la curva de desmagnetización decrece continuamente respecto al campo aplicado. En el diagrama de Zijderveld las componentes vertical y horizontal del espécimen A tienden al origen con traslape de direcciones en todos los especímenes, mientras que en el espécimen H no hay traslape de direcciones. En la proyección estereográfica A presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas, y en H presenta poca dispersión con direcciones normales.

Tabla VI.7 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC7.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|---------|---|---|
| TC7 |  | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales.</p> <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes C, F, G y H para determinar si tendían a una dirección preferencial. C, G y H presentan direcciones normales y reversas, y el espécimen F muestra una dirección preferencial (Tabla 6 del Anexo A).</p> <p>Dados los resultados se decidió aplicar la estadística de Fisher a la muestra a pesar de la gran dispersión, esto se justifica ya que es una muestra no quemada.</p> |

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC7

| | | |
|------|---|--|
| TC7F |  |  |
| TC7G |  |  |

La muestra TC7 tiene 12 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes C, F, G y H.

En la curva de desmagnetización de los cuatro especímenes se observa como la magnetización decrece continuamente respecto al campo aplicado. En el diagrama de Zijderveld las componentes vertical y horizontal de los cuatro especímenes al origen sin traslape de direcciones. En la proyección estereográfica F presenta poca dispersión con direcciones normales, el espécimen C presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas, y, G y H presentan poca dispersión con direcciones normales y reversas.

Tabla VI.8 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC8.

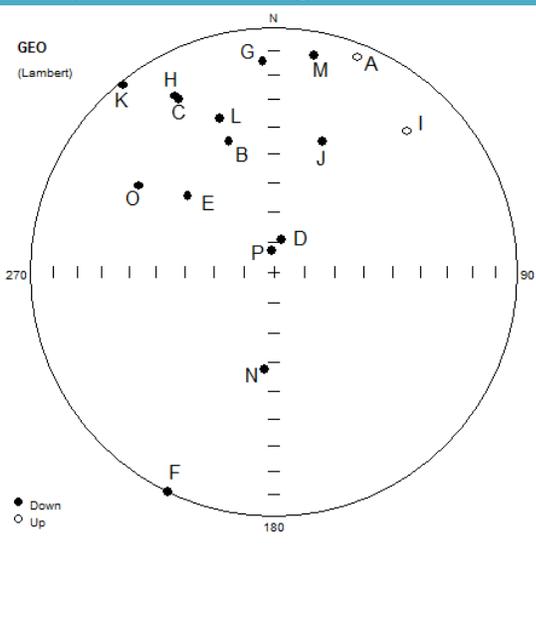
| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|---------|----------------------------------|--|
| TC8 | | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales y reversas.</p> <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes G y H para determinar si tendían a una dirección preferencial, de los cuales obtuvimos que G presentaba direcciones reversas y H presentaba direcciones normales y reversas (Tabla 7 del Anexo A).</p> <p>La muestra se descartó debido a la gran dispersión y a que los especímenes desmagnetizados presentan direcciones normales y reversas por lo que no corresponden a temporalidad del sitio.</p> |

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC8

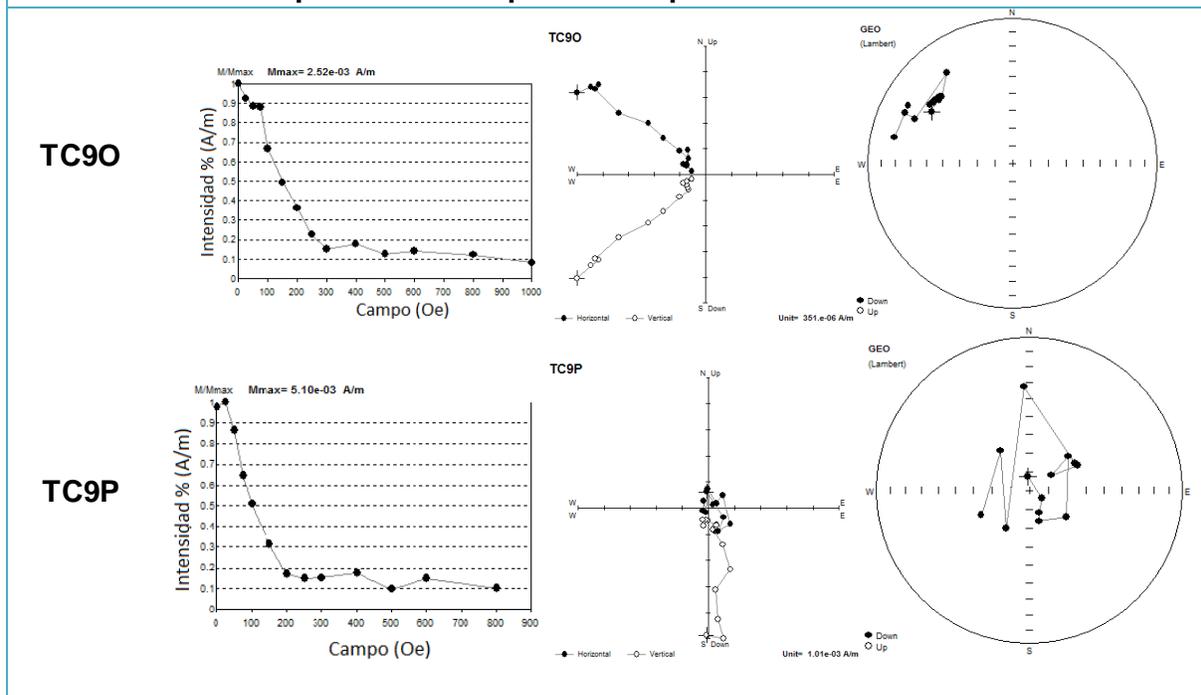
| | | | |
|------|--|--|--|
| TC8G | | | |
| TC8H | | | |

La muestra TC8 tiene 9 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes G y H. Para ambos especímenes se observa como la magnetización decrece respecto al campo aplicado. En el diagrama de Zijderveld se puede observar como las componentes horizontal y vertical tienden al origen sin traslape de direcciones en el espécimen G, mientras que en H hay traslape. Por último, en la proyección estereográfica de ambas hay mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

Tabla VI.9 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC9.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|---------|---|--|
| TC9 |  | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales y reversas.</p> <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes C, E, G, H, J, L, M, O y P para determinar si tendían a una dirección preferencial. L presenta direcciones normales y reversas, mientras que C, E, G, H, J, M y O muestra una dirección preferencial y P tiene mucha dispersión (Tabla 8 del Anexo A).</p> <p>Dados los resultados, se decidió aplicar la estadística de Fisher a la muestra a pesar de la gran dispersión, esto se justifica ya que es una muestra no quemada.</p> |

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC9



La muestra TC9 tiene 16 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes C, E, G, H, J, L, M, O y P.

En la curva de desmagnetización de todos los especímenes se observa como la magnetización decrece continuamente respecto al campo aplicado. En el diagrama de Zijderveld las componentes vertical y horizontal de C, E, G, H, J, L y M tienden al origen sin traslape de direcciones, mientras que en P hay traslape de direcciones. En la proyección estereográfica C, E, G, H, J, M y O

presentan poca dispersión con direcciones normales, el espécimen P presenta mucha dispersión con direcciones normales y, L presenta poca dispersión con direcciones normales y reversas.

Tabla VI.10 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC10.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|--|---|---|
| TC10 | | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales y reversas.</p> |
| | <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes D, F, H y J para determinar si tendían a una dirección preferencial. H presenta direcciones normales y reversas, mientras que F y J muestra una dirección preferencial y D tiene mucha dispersión (Tabla 9 del Anexo A).</p> | |
| <p>La muestra se descartó porque presenta mucha dispersión y pocos especímenes correspondientes a la temporalidad del sitio en la proyección estereográfica.</p> | | |

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC10

| | | | |
|-------|--|--|--|
| TC10D | | | |
| | | | |

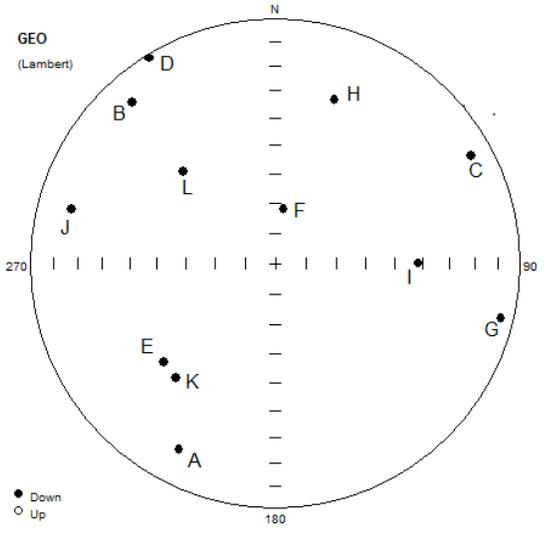
La muestra TC10 tiene 12 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes D, F, H y J.

En la curva de desmagnetización de los cuatro especímenes se observa como la magnetización decrece continuamente respecto al campo aplicado. En el diagrama de Zijderveld las componentes vertical y horizontal de D y H tienden al origen con traslape de direcciones, mientras que en F y J no hay traslape. En la proyección estereográfica D presenta mucha dispersión con direcciones normales, los especímenes F y G presentan poca dispersión con direcciones normales y, H presenta poca dispersión con direcciones normales y reversas.

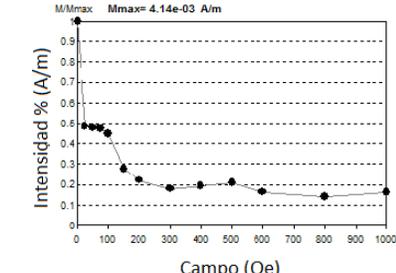
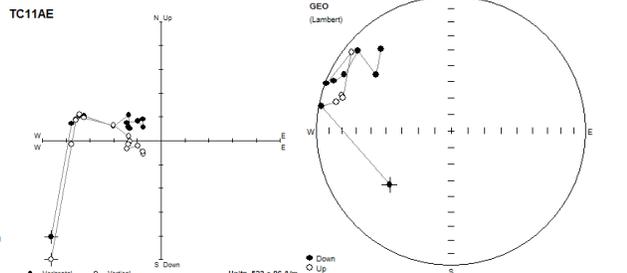
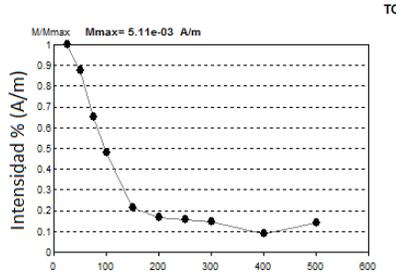
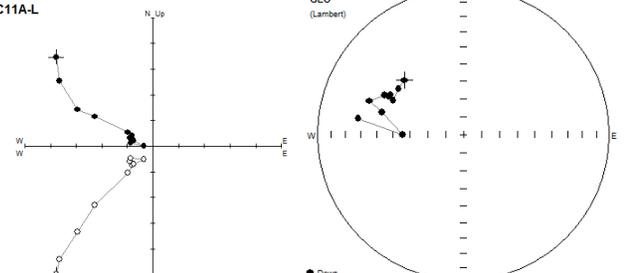
Tabla VI.11 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC9y10.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|---|----------------------------------|--|
| <p>TC9y10</p> | | <p>La muestra TC9 y TC10 corresponden a la misma etapa del sitio por lo que las consideraremos como una sola muestra (TC9y10).</p> <p>Los especímenes desmagnetizados de ambas muestras ya fueron descritos anteriormente (Tabla 8 y 9 del Anexo A).</p> <p>La muestra presenta especímenes correspondientes a la temporalidad del sitio, por lo que se decidió aplicar la estadística de Fisher a la muestra a pesar de la gran dispersión, esto se justifica ya que es una muestra no quemada.</p> |
| Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC9y10 | | |
| <p>La muestra TC9 tiene 16 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes C, E, G, H, J, L, M, O y P. Y la muestra TC10 tiene 12 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes D, F, H y J. Por lo que la muestra TC9y10 tiene 28 especímenes piloto, los cuales ya se describieron anteriormente.</p> | | |

Tabla VI.12 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC11A.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|---------|---|--|
| TC11A |  | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales.</p> <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes A, B, E, H, J, K y L para determinar si tendían a una dirección preferencial. A, E y H presenta direcciones normales y reversas, mientras que B, H, J, K y L muestra una dirección preferencial (Tabla 10 del Anexo A).</p> <p>La muestra se descartó porque presenta mucha dispersión y pocos especímenes correspondientes a la temporalidad del sitio en la proyección estereográfica.</p> |

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC11A

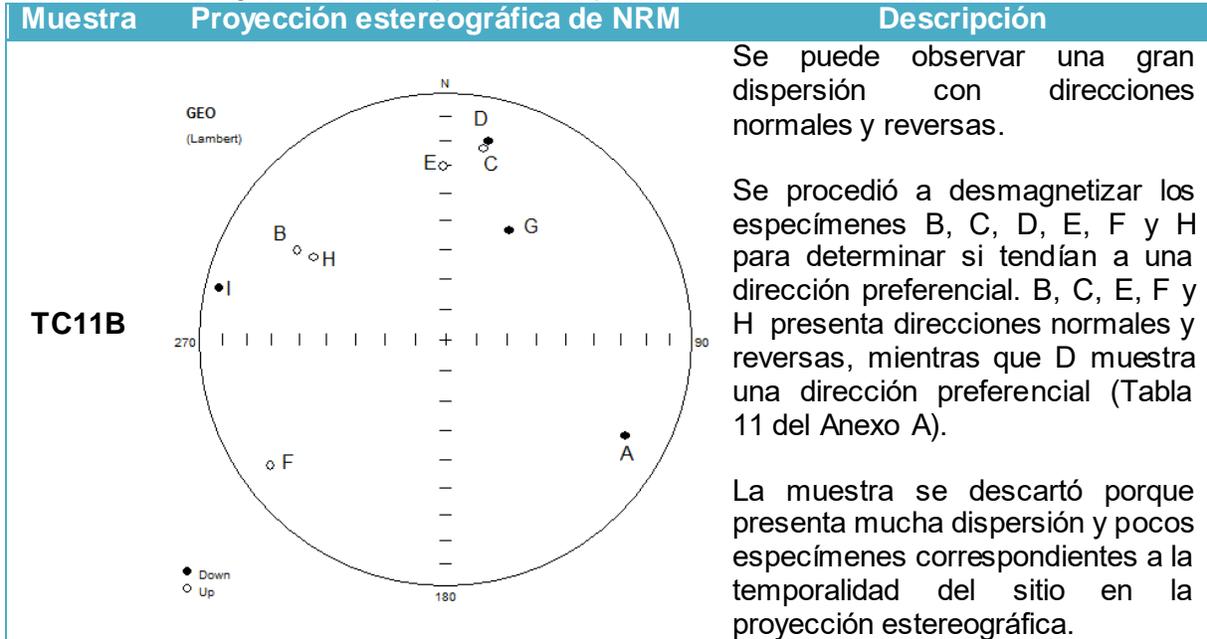
| | | |
|--------|---|--|
| TC11AE |  |  |
| TC11AL |  |  |

La muestra TC11A tiene 12 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes A, B, E, H, J, K y L.

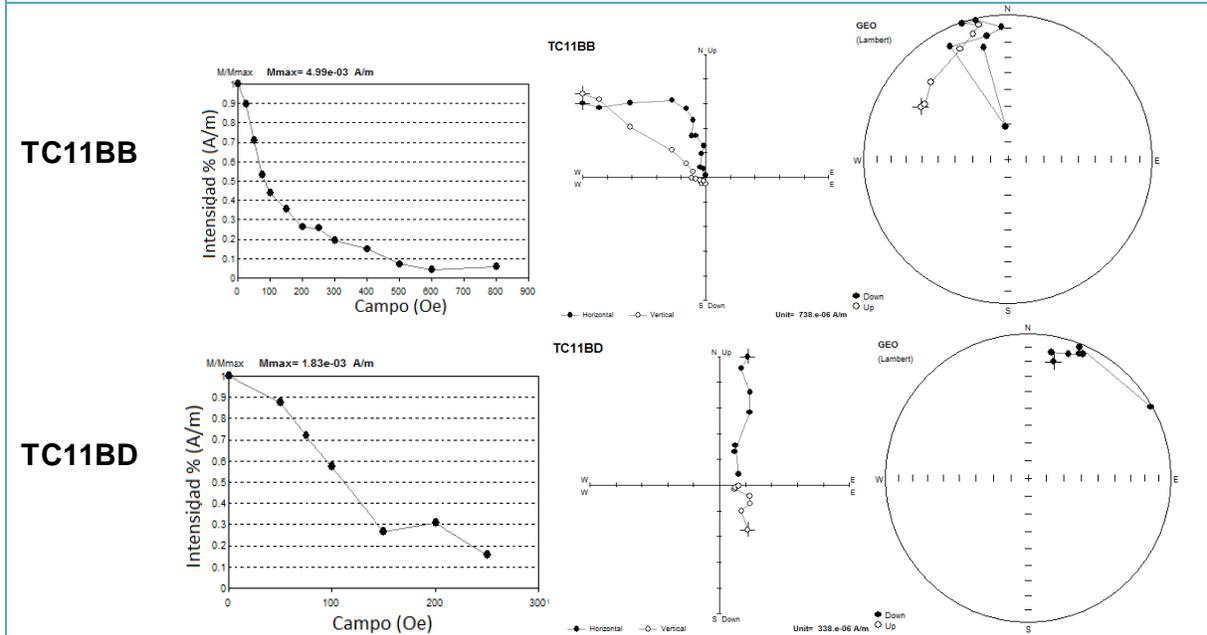
En la curva de desmagnetización de todos especímenes se observa como la magnetización decrece continuamente respecto al campo aplicado. En el diagrama de Zijderveld las componentes vertical y horizontal de los especímenes B, H, J y L tienden al origen sin traslape de direcciones, mientras que A, E y K tienden al origen con traslape de direcciones. En la proyección estereográfica B, H, K y L presentan poca dispersión con direcciones

normales, mientras que A y E presentan mucha dispersión con direcciones normales y reversas y, J presenta mucha dispersión con direcciones normales.

Tabla VI.13 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC11B.



Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC11B



La muestra TC11B tiene 9 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes B, C, D, E, F y H.

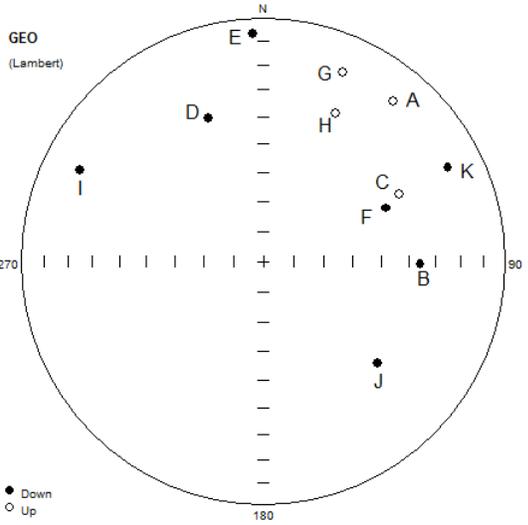
La curva de desmagnetización de todos los especímenes decrecen continuamente respecto al campo aplicado. En el diagrama de Zijderveld de

los especímenes D y F las componentes vertical y horizontal tienden al origen sin traslape de direcciones, mientras que en las demás se observa un traslape de direcciones. Por último, la proyección estereográfica del espécimen D presenta poca dispersión direcciones normales, los especímenes C y E tienen poca dispersión con direcciones normales y reversas, en los especímenes B y H se observa mucha dispersión con direcciones normales y reversas, y el espécimen F tiene poca dispersión con direcciones reversas.

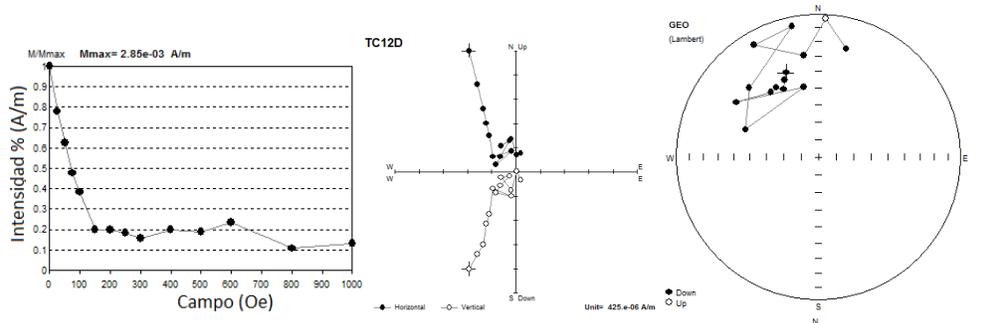
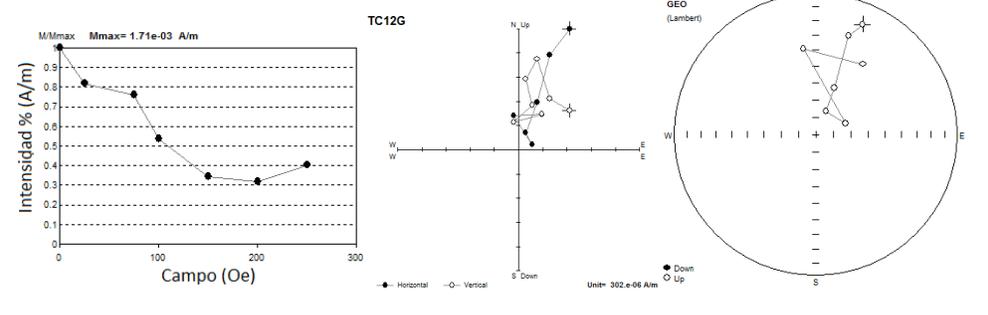
Tabla VI.14 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC11.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|---|----------------------------------|---|
| <p>TC11</p> | | <p>La muestra TC11A y TC11B corresponden a la misma etapa del sitio por lo que las consideraremos como una sola muestra (TC11).</p> <p>Los especímenes desmagnetizados de ambas muestras ya fueron descritos anteriormente (Tabla 10 y 11 del Anexo A).</p> <p>La muestra presenta especímenes correspondientes a la temporalidad del sitio, por lo que se decidió aplicar la estadística de Fisher a la muestra a pesar de la gran dispersión, esto se justifica ya que es una muestra no quemada.</p> |
| Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC11 | | |
| <p>La muestra TC11A tiene 12 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes A, B, E, H, J, K y L, y la muestra TC11B tiene 9 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes B, C, D, E, F y H. Por lo que la muestra TC11 tiene 21 especímenes piloto, los cuales ya se describieron anteriormente.</p> | | |

Tabla VI.15 Proyección estereográfica de las NRM de los especímenes, así como el lavado magnético de los especímenes representativos de la muestra TC12.

| Muestra | Proyección estereográfica de NRM | Descripción |
|---------|---|--|
| TC12 |  | <p>Se puede observar una gran dispersión con direcciones normales y reversas.</p> <p>Se procedió a desmagnetizar los especímenes D, E, G e I para determinar si tendían a una dirección preferencial, de los cuales obtuvimos que todas presentaban direcciones normales y reversas con una gran dispersión (Tabla 12 del Anexo A).</p> <p>La muestra se descartó debido a la gran dispersión y a que los especímenes desmagnetizados presentan direcciones normales y reversas por lo que no corresponden a temporalidad del sitio.</p> |

Descripción de los especímenes piloto de la muestra TC12

| | |
|-------|--|
| TC12D |  |
| TC12G |  |

La muestra TC12 tiene 11 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes D, E, G e I.

Se observa como la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado en todos los especímenes. En el diagrama de Zijderveld las componentes horizontal y vertical tienden al origen sin traslape de

direcciones en los especímenes D e I, mientras que en E y G presentan traslape de direcciones. La proyección estereográfica de D, E e I presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas, y en el espécimen G hay direcciones reversas solamente.

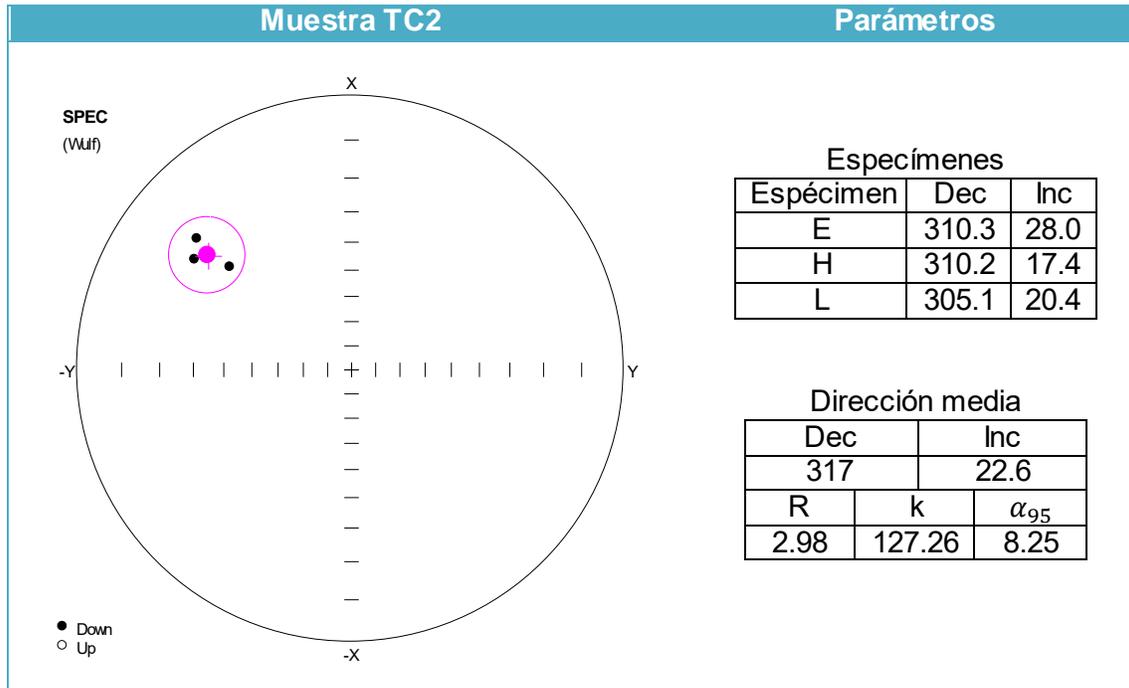
La red estereográfica, el diagrama de Zijdeveld y el espectro de desmagnetización de todos los especímenes desmagnetizados están contenidos en el Anexo A.

Después de desmagnetizar los especímenes pilotos y obtener sus correspondientes ajustes, se observa en una proyección estereográfica todos los especímenes de la muestra y se selecciona un grupo con menor dispersión (dirección preferencial) para luego, mediante el uso de la estadística de Fisher se obtiene la dirección magnética media (D, I) y los parámetros R, k y α_{95} .

Recordemos que el parámetro R es la magnitud del vector resultante y es válido para valores superiores a $(n-1)*(0.8)$ donde n es el número de especímenes, el parámetro k es una estimación de la precisión (dispersión) y es válido para valores superiores a 30, y el parámetro α_{95} es un límite de confianza de la dirección principal y es válido para valores menores a 10 para muestras quemadas, sin embargo, para algunas de nuestras muestras se obtuvieron valores superiores pero se considero aceptable ya que son muestras no quemadas.

Las siguiente tablas muestran los especímenes seleccionados de cada muestra con sus correspondientes parámetros, así como la declinación e inclinación media obtenida con el uso de la estadística de Fisher.

Tabla VI.16 Muestra la proyección estereográfica y los parámetros obtenido a través de la estadística de Fisher de la muestra TC2.



La muestra TC2 presenta una gran dispersión por lo que solo se eligieron 3 de los 12 especímenes, los cuales en conjunto tienen una menor dispersión.

La estadística de Fisher determina la dirección media (declinación e inclinación), el límite de confianza $10 > \alpha_{95} = 8.25$, el parámetro k de precisión $30 < k = 127.26$ y el parámetro $1.6 < R = 2.98$.

Los 3 parámetros obtenidos se encuentran dentro de los límites aceptados a pesar de ser una muestra no quemada.

Tabla VI.17 Muestra la proyección estereográfica y los parámetros obtenido a través de la estadística de Fisher de la muestra TC5.

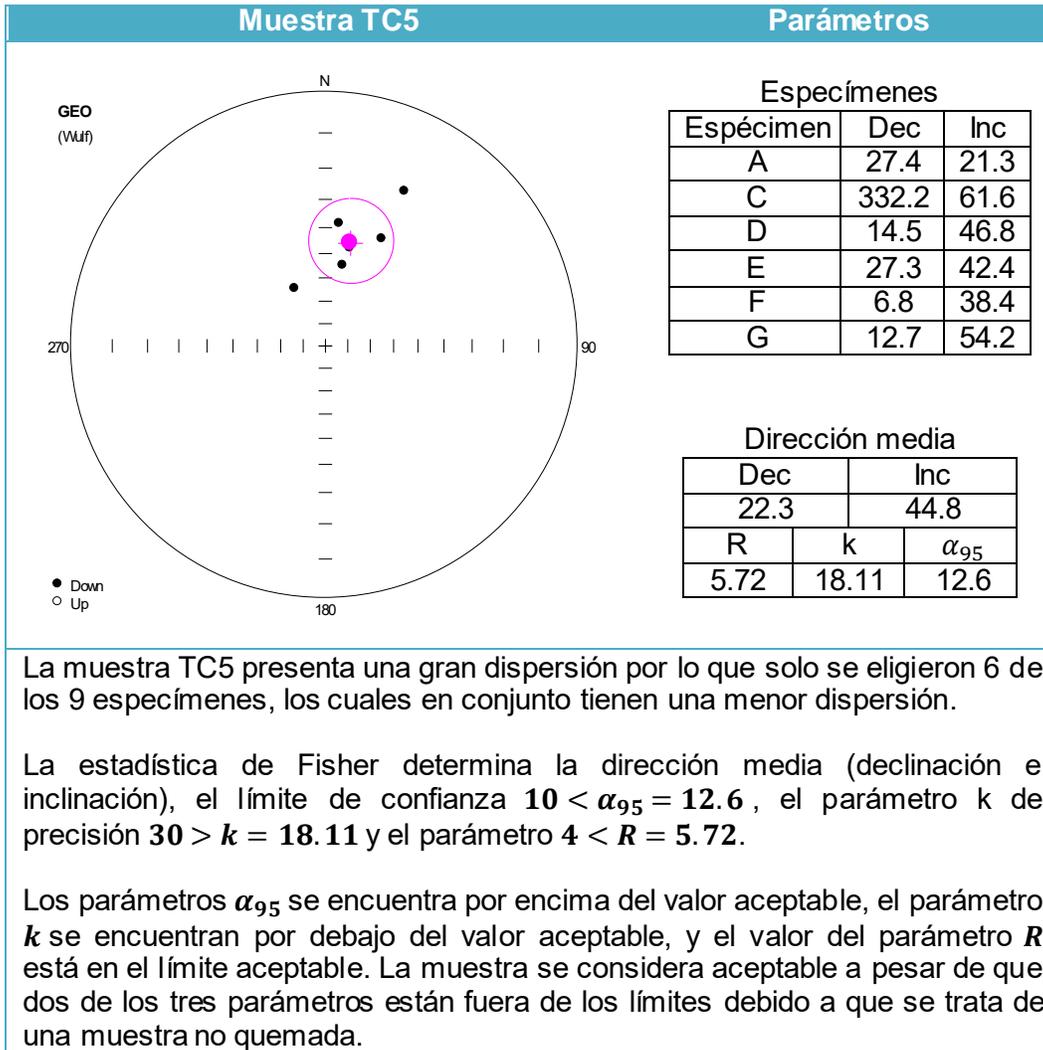


Tabla VI.18 Muestra la proyección estereográfica y los parámetros obtenido a través de la estadística de Fisher de la muestra TC6..

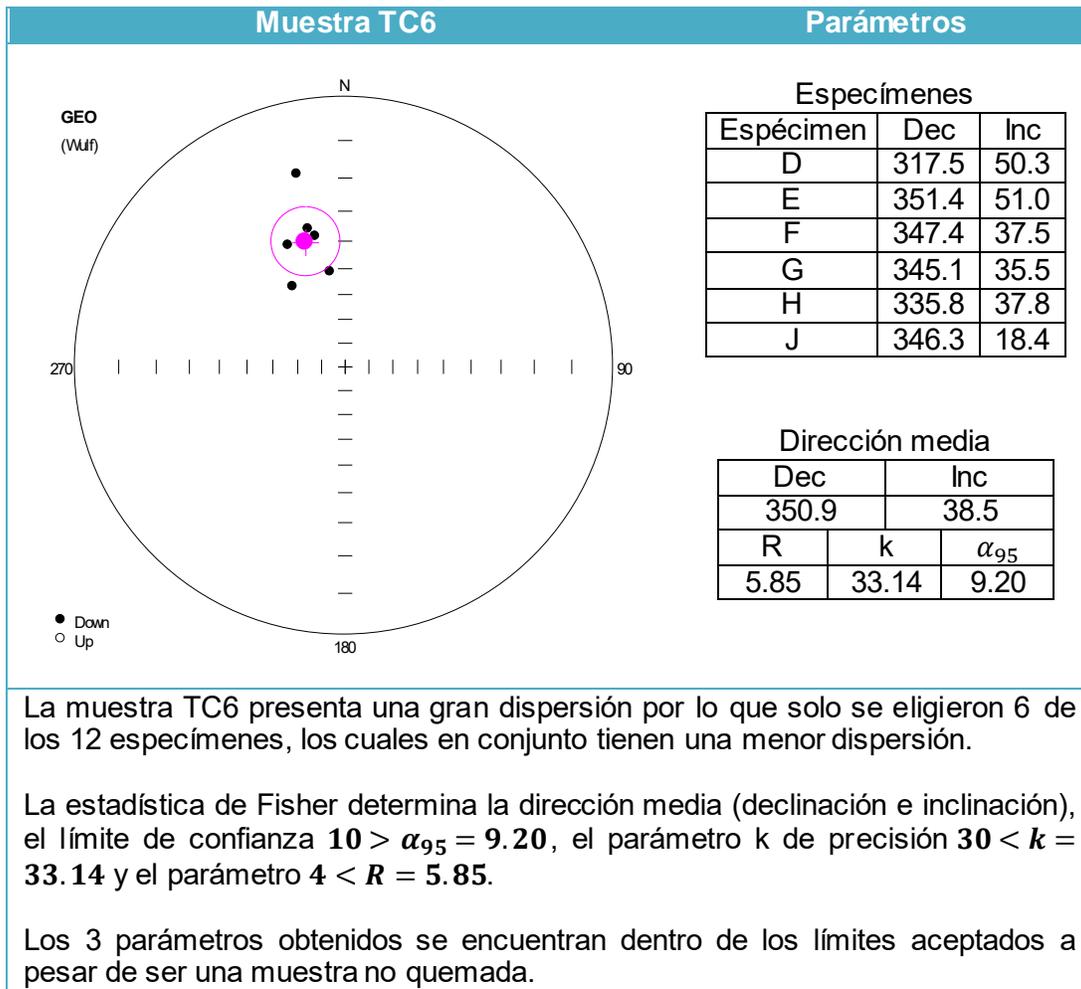
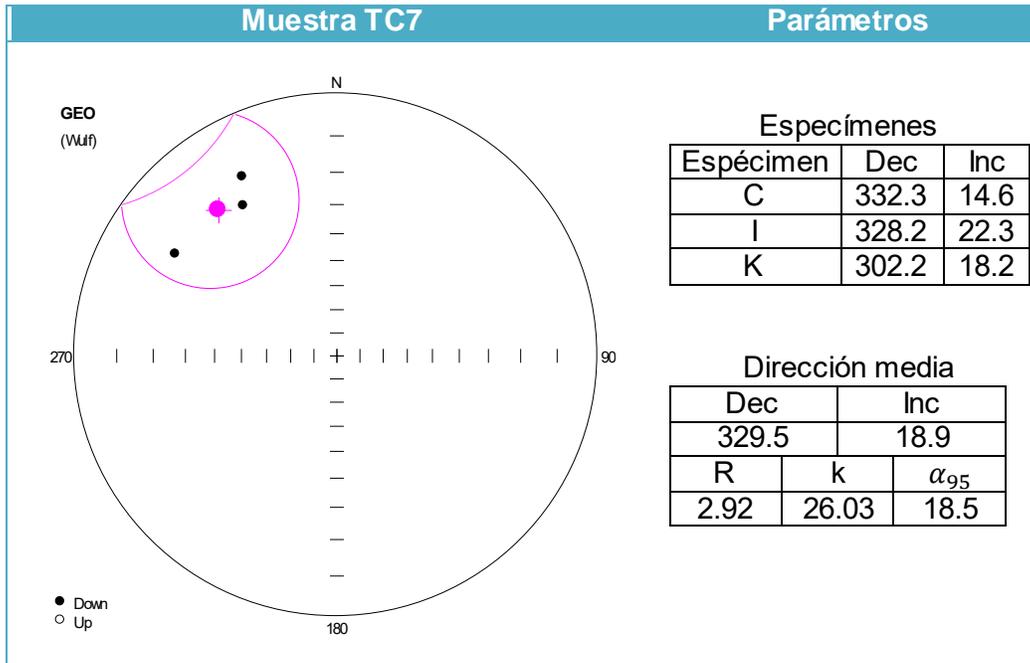


Tabla VI.19 Muestra la proyección estereográfica y los parámetros obtenido a través de la estadística de Fisher de la muestra TC7.

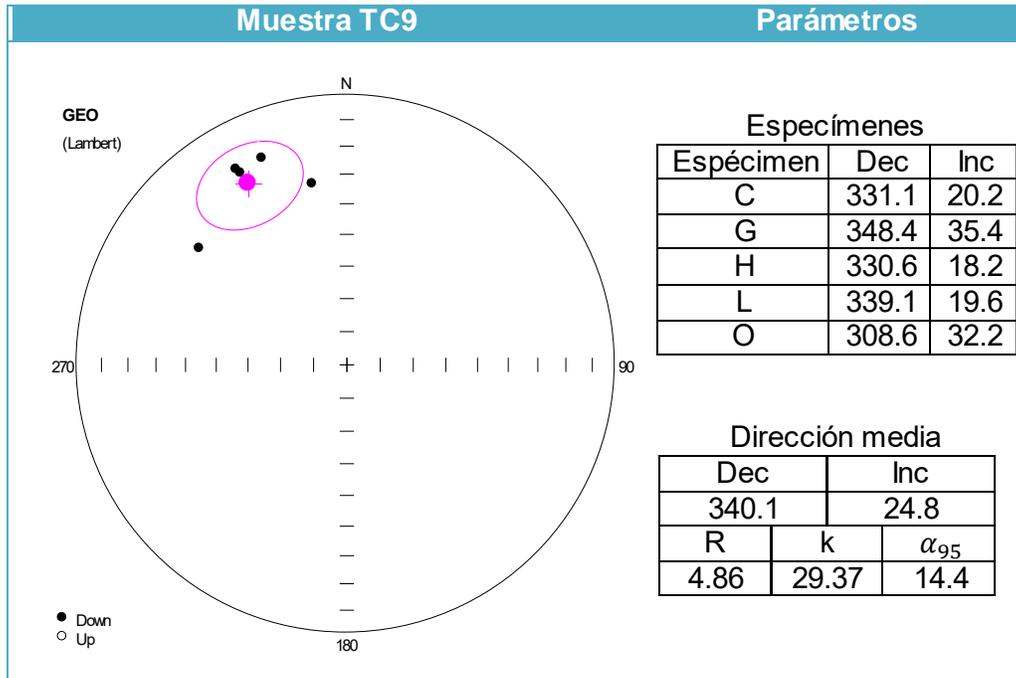


La muestra TC7 presenta una gran dispersión por lo que solo se eligieron 3 de los 12 especímenes, los cuales en conjunto tienen una menor dispersión.

La estadística de Fisher determina la dirección media (declinación e inclinación), el límite de confianza $10 < \alpha_{95} = 18.5$, el parámetro k de precisión $30 > k = 26.03$ y el parámetro $2.4 < R = 2.92$.

Los parámetros α_{95} se encuentra por encima del valor aceptable, el parámetro k se encuentran por debajo del valor aceptable, y el valor del parámetro R está en el límite aceptable. La muestra se considera aceptable a pesar de que dos de los tres parámetros están fuera de los límites debido a que se trata de una muestra no quemada.

Tabla VI.20 Muestra la proyección estereográfica y los parámetros obtenido a través de la estadística de Fisher de la muestra TC9.



La muestra TC9 presenta una gran dispersión por lo que solo se eligieron 5 de los 16 especímenes, los cuales en conjunto tienen una menor dispersión.

La estadística de Fisher determina la dirección media (declinación e inclinación), el límite de confianza $10 < \alpha_{95} = 14.4$, el parámetro k de precisión $30 > k = 29.37$ y el parámetro $3.2 < R = 4.86$.

Los parámetros α_{95} se encuentra por encima del valor aceptable, el parámetro k se encuentran por debajo del valor aceptable, y el valor del parámetro R está en el límite aceptable. La muestra se considera aceptable a pesar de que dos de los tres parámetros están fuera de los límites debido a que se trata de una muestra no quemada.

Tabla VI.21 Muestra la proyección estereográfica y los parámetros obtenido a través de la estadística de Fisher de la muestra TC9y10.

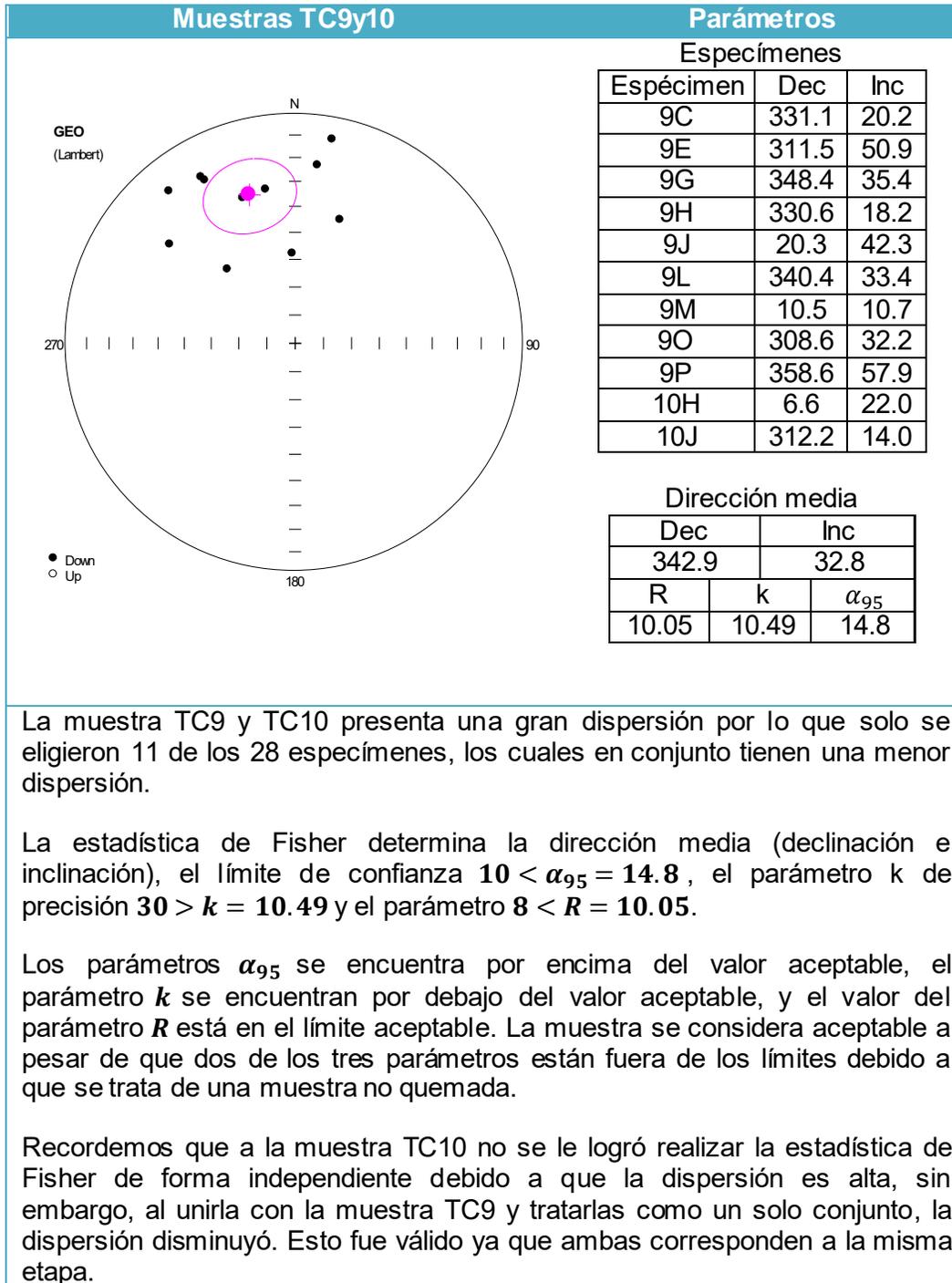
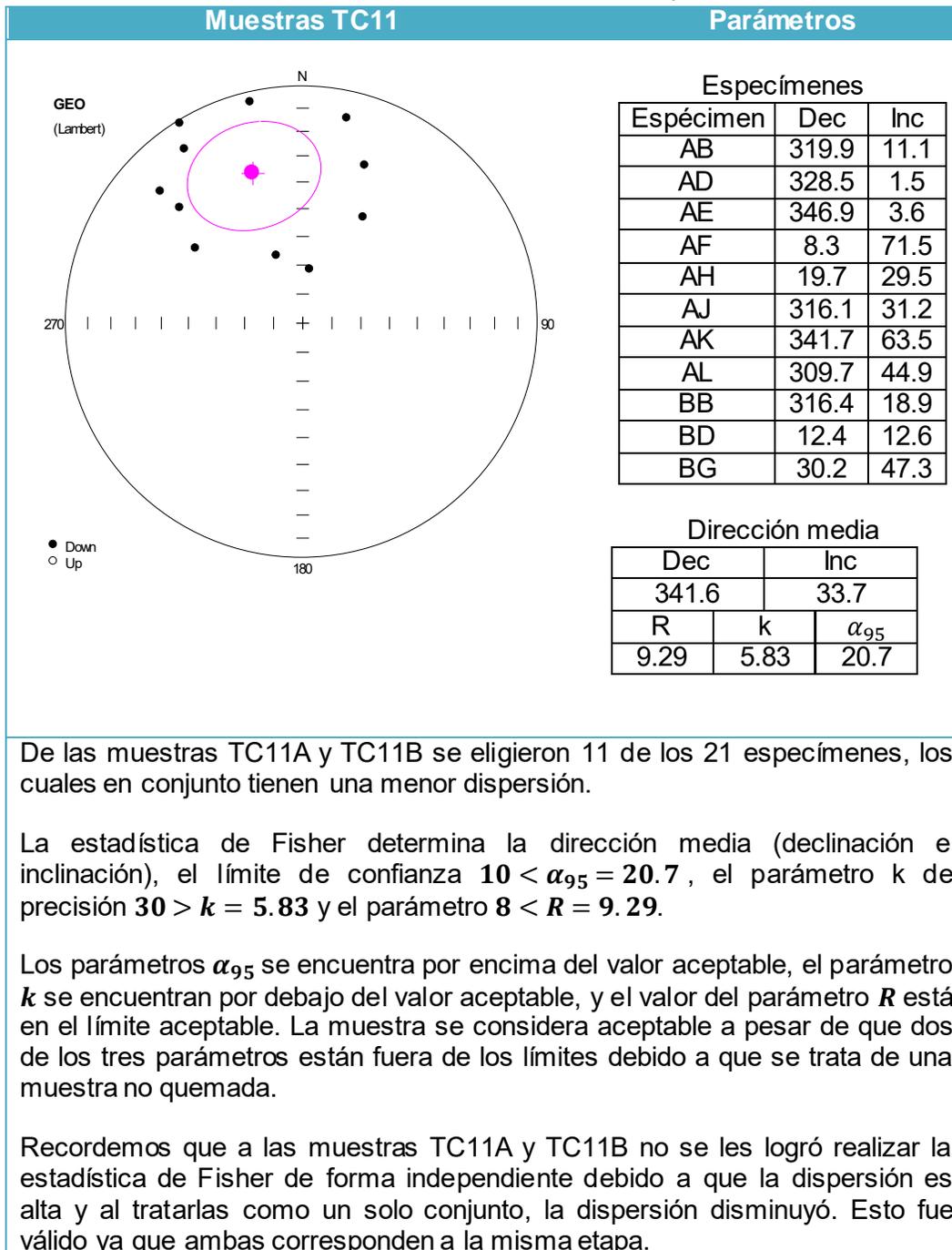


Tabla VI.22 Muestra la proyección estereográfica y los parámetros obtenido a través de la estadística de Fisher de la muestra TC11A y TC11B.



VI.2 Resultados de Estudios Complementarios

VI.2.1 Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS)

Los valores de Susceptibilidad Magnética Volumétrica (adimensional) de cada espécimen se muestran a continuación.

Tabla VI.23 Exhibe la Susceptibilidad Magnética Volumétrica de las muestras obtenida en Tehuacán el Viejo.

| Muestra | Espécimen | Susceptibilidad | Muestra | Espécimen | Susceptibilidad |
|---------|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|
| TC1 | TC1A | 456 | TC8 | TC8C | 114.9 |
| | TC1B | 83.3 | | TC8D | 57.1 |
| | TC1C | 94.6 | | TC8E | 50.2 |
| | TC1D | 111.6 | | TC8G | 70.6 |
| | TC1E | 67.5 | | TC8H | 97.5 |
| | TC1F | 756.5 | | TC8I | 86.1 |
| | TC1G | 100.8 | | TC8J | 55.8 |
| | TC1H | 89.9 | | TC8K | 62.4 |
| | TC1I | 91.6 | | TC8L | 106.6 |
| | TC1J | 99.2 | | TC9A | 147.8 |
| TC2 | TC2A | 207.0 | TC9 | TC9B | 127.7 |
| | TC2B | 160.6 | | TC9C | - |
| | TC2C | 257.4 | | TC9D | 133.9 |
| | TC2D | 214.4 | | TC9E | - |
| | TC2E | 170.6 | | TC9F | - |
| | TC2F | 76.2 | | TC9G | - |
| | TC2G | - | | TC9H | 114.3 |
| | TC2H | 116.8 | | TC9I | - |
| | TC2I | 114.7 | | TC9J | - |
| | TC2J | 227.4 | | TC9K | 338.4 |
| TC3 | TC2K | 65.5 | TC10 | TC9L | - |
| | TC2L | 359.5 | | TC9M | 69.7 |
| | TC3A | 387.0 | | TC9N | - |
| | TC3B | 337.6 | | TC9O | - |
| | TC3C | 382.6 | | TC9P | 197.0 |
| | TC3D | 342.4 | | TC10A | 73.8 |
| | TC3E | 323.4 | | TC10B | 168.2 |
| | TC3F | 333.4 | | TC10C | 271.8 |
| | TC3G | 270.4 | | TC10D | - |
| | TC3H | 357.8 | | TC10E | 107.4 |
| TC4 | TC3I | 411.5 | TC10F | 102.8 | |
| | TC3J | 162.6 | TC10G | 297.2 | |
| TC4 | TC3K | 343.6 | TC10H | 78.8 | |
| | TC4A | 1,227.0 | TC10I | - | |
| | TC4B | 1,035.0 | TC10J | 193.4 | |

| | | | | | |
|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| TC4 | TC4C | 209.0 | TC11A | TC10K | 246.2 |
| | TC4D | 296.0 | | TC10L | - |
| | TC4E | 308.2 | | TC11AA | - |
| | TC4F | 122.6 | | TC11AB | 64.2 |
| | TC4G | 244.2 | | TC11AC | 69.1 |
| TC5 | TC5A | 52.3 | | TC11AD | 91.3 |
| | TC5B | 68.0 | | TC11AE | 82.6 |
| | TC5C | 56.4 | | TC11AF | 91.9 |
| | TC5D | 73.9 | | TC11AG | 143.1 |
| | TC5E | 66.9 | | TC11AH | 97.7 |
| | TC5F | 61.1 | | TC11AI | - |
| | TC5G | 102.0 | | TC11AJ | 67.3 |
| | TC5H | 89.9 | | TC11AK | - |
| TC5I | 100.1 | TC11AL | | 64.3 | |
| TC6 | TC6A | 76.4 | | TC11B | TC11BA |
| | TC6B | 228.0 | TC11BB | | 56.4 |
| | TC6C | 338.0 | TC11BC | | - |
| | TC6D | 292.8 | TC11BD | | 58.2 |
| | TC6E | 117.8 | TC11BE | | - |
| | TC6F | 128.4 | TC11BF | | - |
| | TC6G | 198.6 | TC11BG | | 158.5 |
| | TC6H | 199.8 | TC11BH | | - |
| | TC6I | 174.0 | TC11BI | | 57.0 |
| | TC6J | 128.0 | TC12A | | 105.6 |
| | TC6K | 140.2 | TC12B | 83.4 | |
| | TC6L | 86.7 | TC12C | 54.5 | |
| TC7 | TC7A | - | TC12 | TC12D | 106.0 |
| | TC7B | - | | TC12E | 97.9 |
| | TC7C | 54.0 | | TC12F | - |
| | TC7D | - | | TC12G | 112.8 |
| | TC7E | 57.0 | | TC12H | - |
| | TC7F | - | | TC12I | 62.5 |
| | TC7G | 196.4 | | TC12J | 100.4 |
| | TC7H | 54.8 | | TC12K | 76.9 |
| | TC7I | 71.1 | | | |
| | TC7J | 53.2 | | | |
| | TC7K | 84.5 | | | |
| TC7L | 51.8 | | | | |

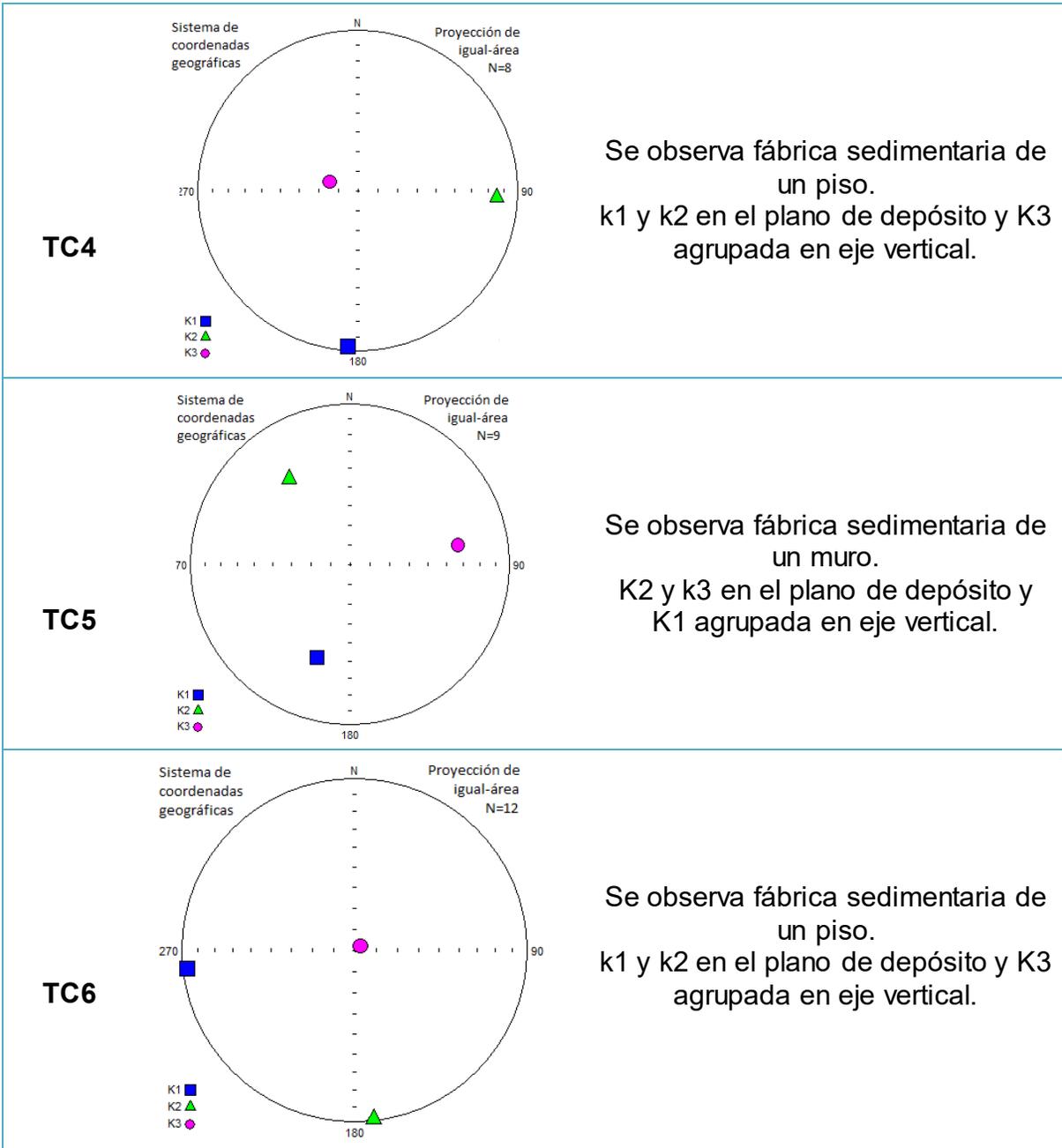
Posteriormente se midió la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS) en el mismo susceptibilímetro Kappabridges KLY-2, el cual emplea 15 direcciones.

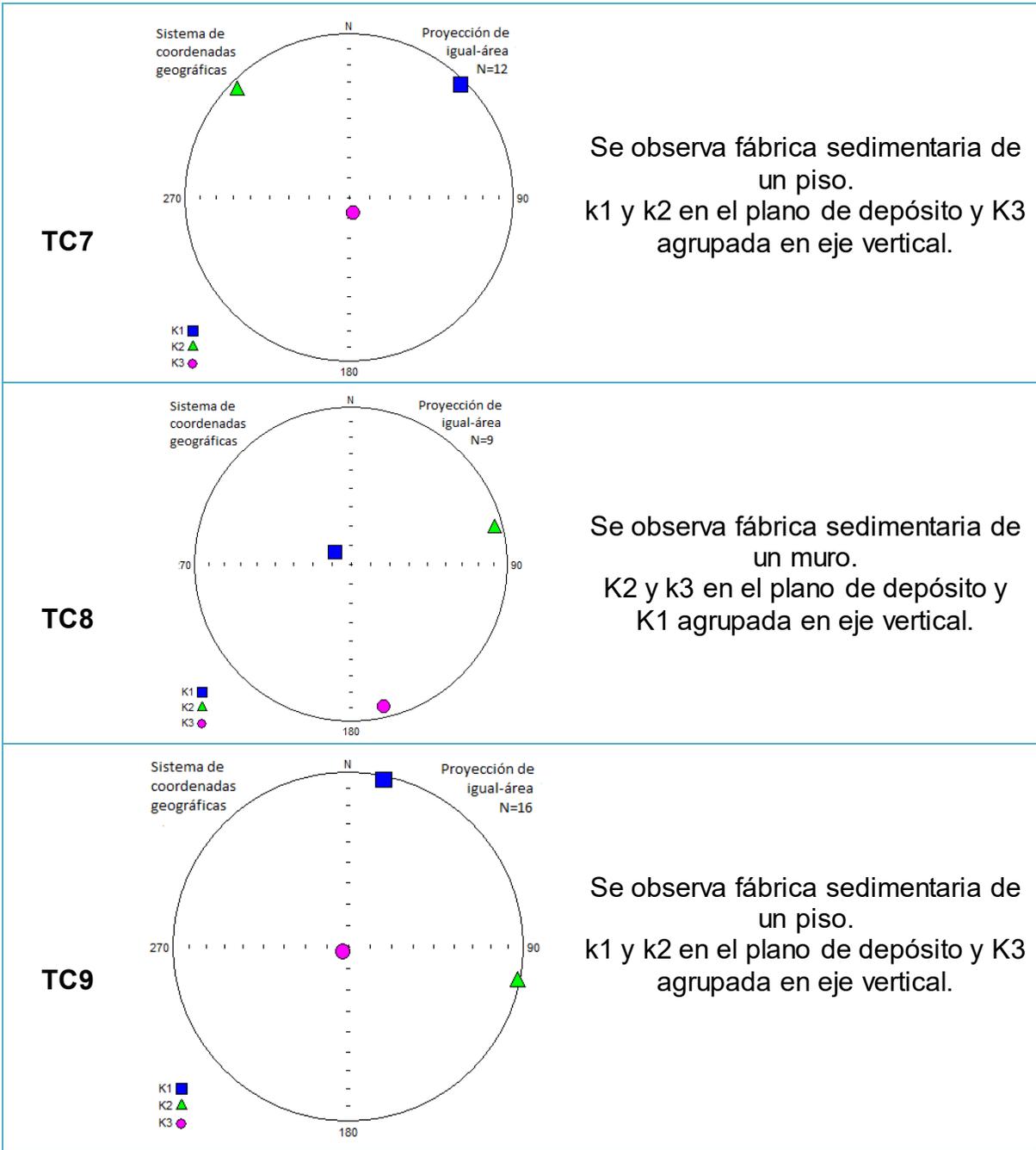
La AMS tiene como objetivo describir como están organizados los portadores de información magnética dentro del material arqueológico, la siguiente tabla muestra

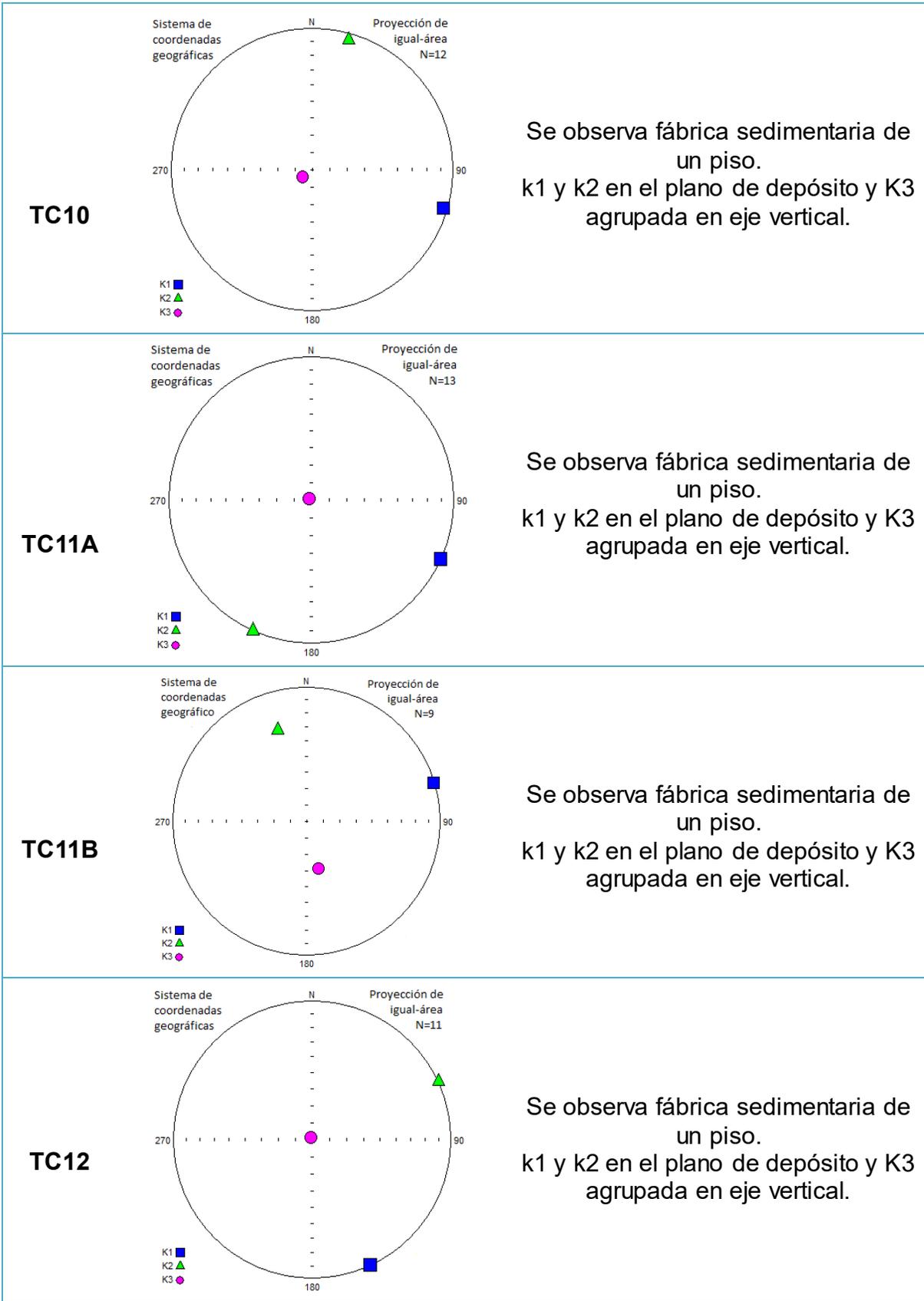
el tipo de fábrica magnética se trata.

Tabla VI.24 Gráficas de la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética promedio y del tipo de fábrica asociada a cada una.

| Muestra | AMS promedio | Tipo de fábrica |
|-------------------|--|---|
| <p>TC1</p> | <p>Sistema de coordenadas geográficas</p> <p>Proyección de igual-área N=10</p> <p>270 90 180</p> <p>K1 ■ K2 ▲ K3 ●</p> | <p>Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical.</p> |
| <p>TC2</p> | <p>Sistema de coordenadas geográficas</p> <p>Proyección de igual-área N=12</p> <p>270 90 180</p> <p>K1 ■ K2 ▲ K3 ●</p> | <p>Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical.</p> |
| <p>TC3</p> | <p>Sistema de coordenadas geográficas</p> <p>Proyección de igual-área N=11</p> <p>270 90 180</p> <p>K1 ■ K2 ▲ K3 ●</p> | <p>Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical.</p> |







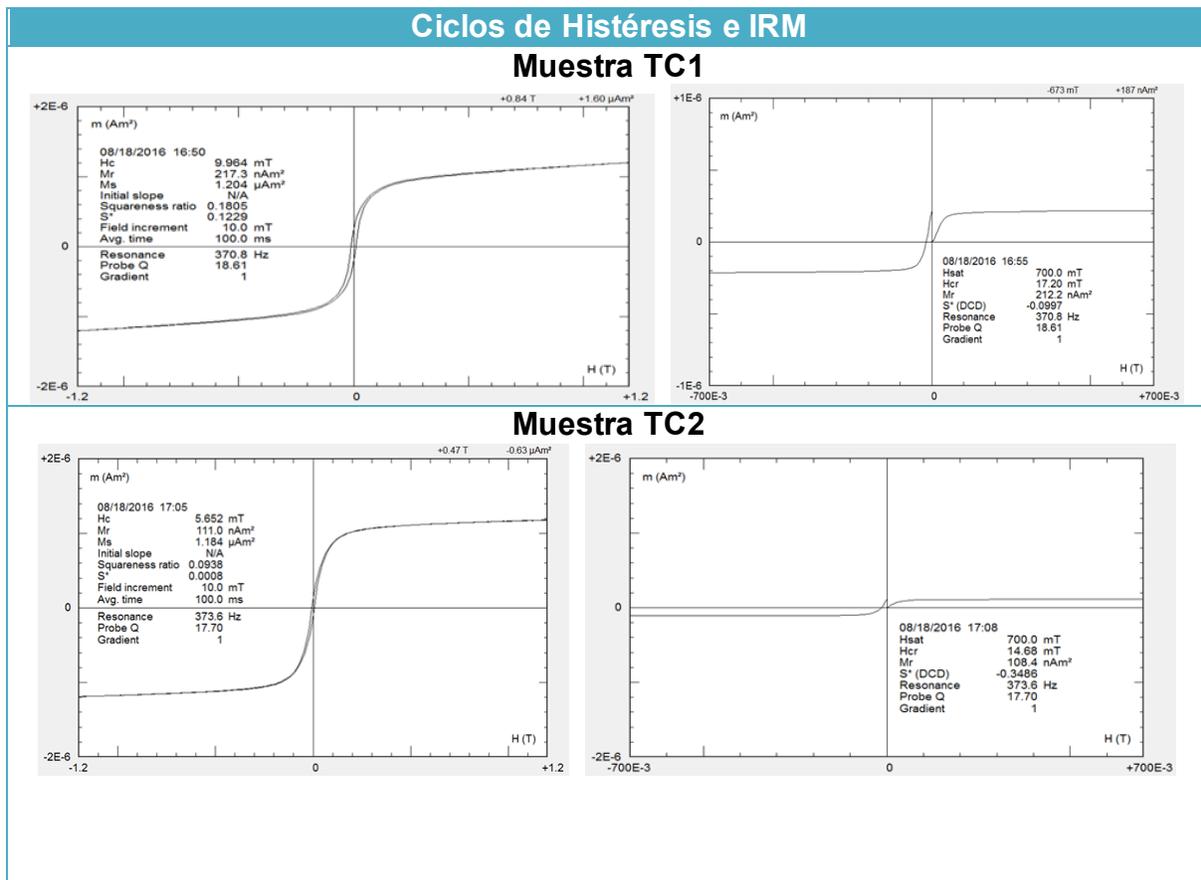
Esta técnica confirma que después de la fábrica de tipo sedimentario no existe alguna otra modificación posterior.

Los resultados de la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética de cada uno de los especímenes y promedio de cada una de las muestras están contenidos en el Anexo B.

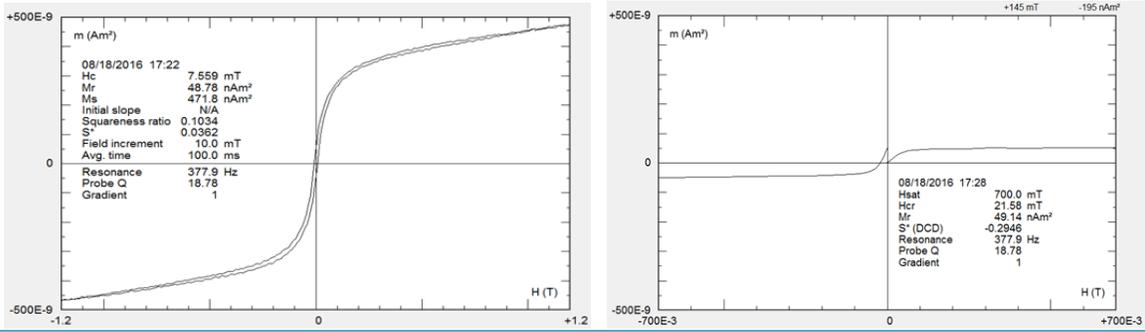
VI.2.2 Ciclo de Histéresis y Magnetización Remanente Isotérmica (IRM)

A continuación se muestran los ciclos de Histéresis e IRM con sus correspondientes parámetros.

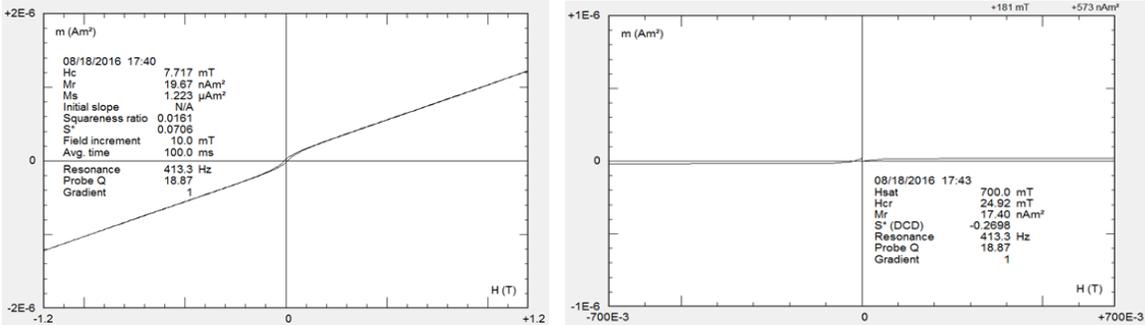
Tabla VI.25 Muestra los ciclos de Histéresis e IRM de la muestra TC12.



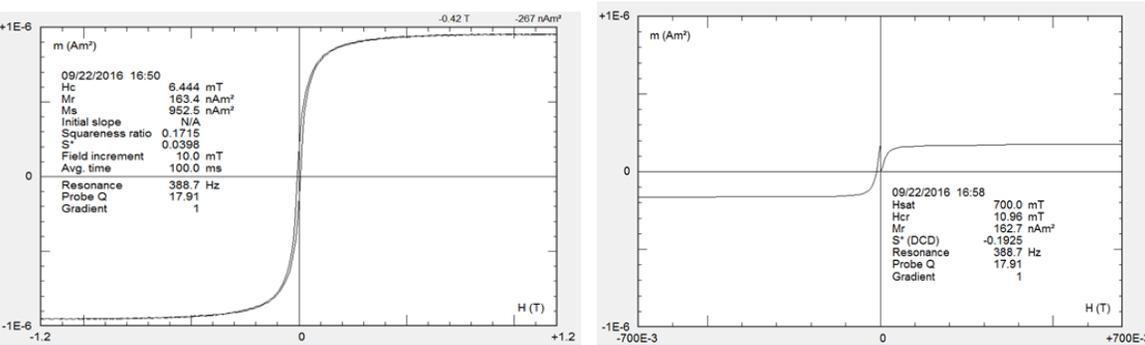
Muestra TC3



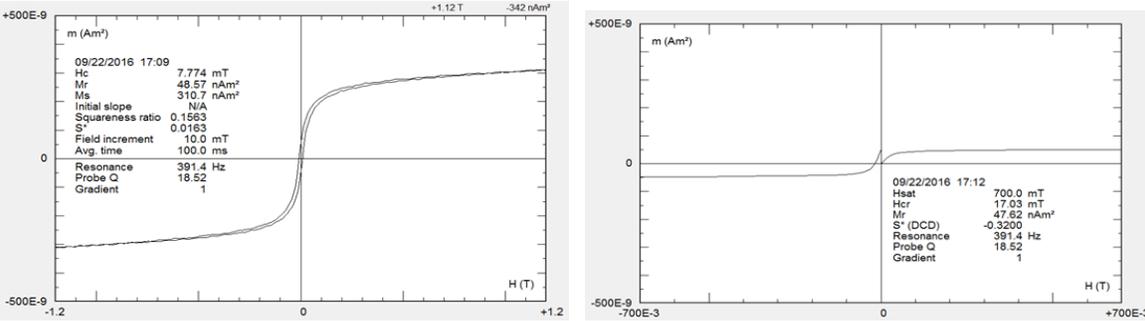
Muestra TC4



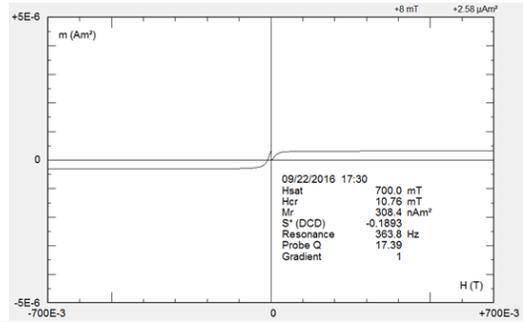
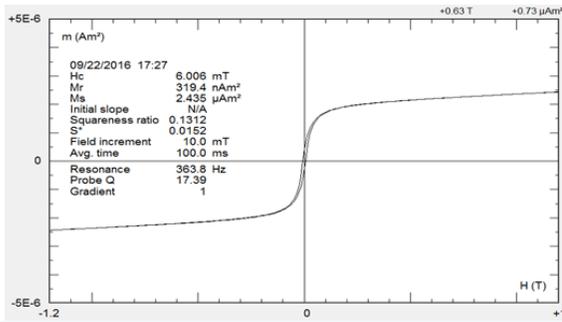
Muestra TC5



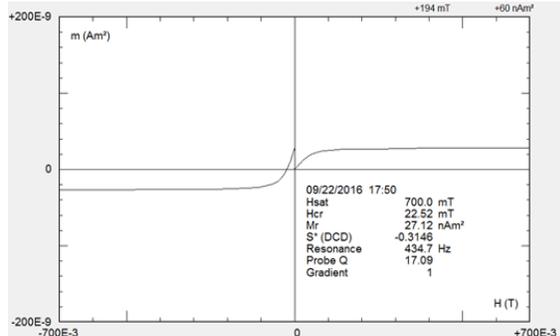
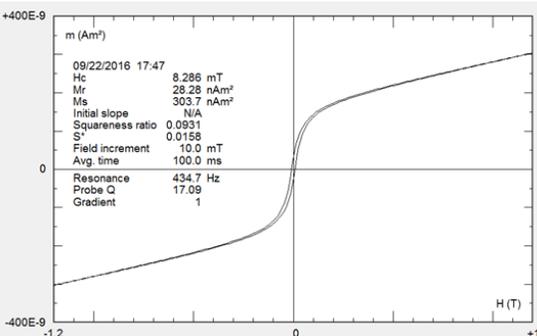
Muestra TC6



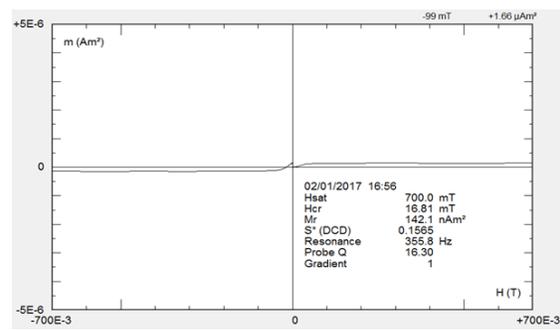
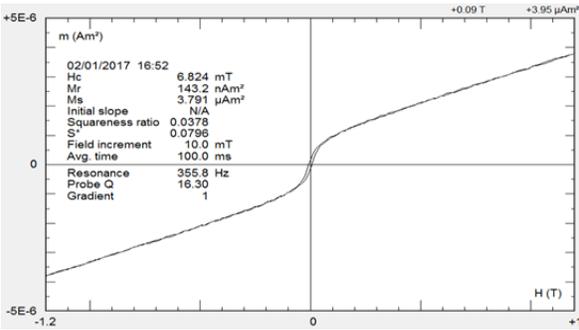
Muestra TC7



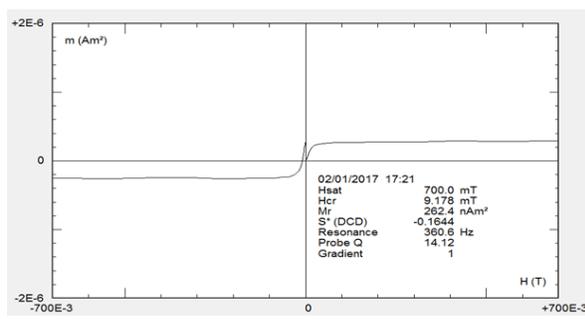
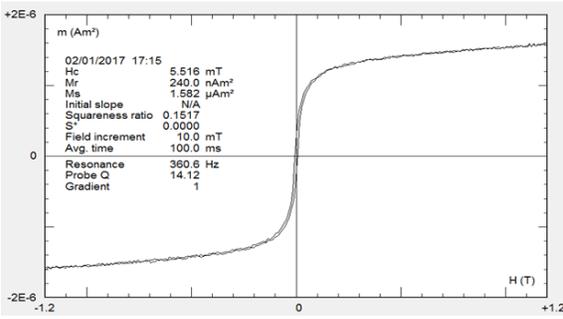
Muestra TC8

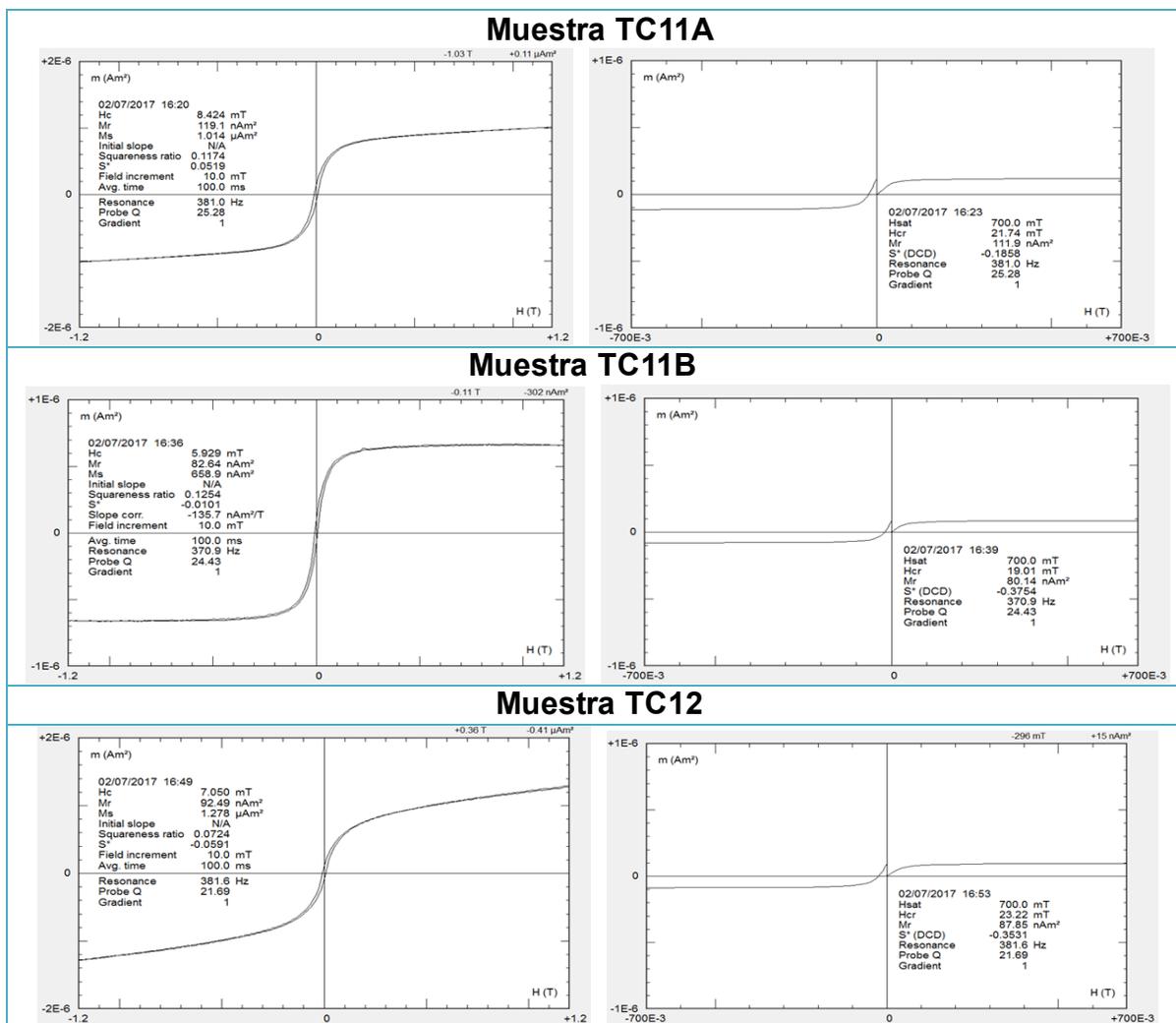


Muestra TC9



Muestra TC10





Las muestras que presentan un punto de saturación son TC1 a $1.204 \pm 5\% \mu\text{Am}^2$, TC2 a $1.184 \pm 5\% \mu\text{Am}^2$, TC5 a $952.5 \pm 5\% \text{nAm}^2$, TC6 a $310.7 \pm 5\% \text{nAm}^2$, TC7 a $2.435 \pm 5\% \mu\text{Am}^2$, TC10 a $1.582 \pm 5\% \mu\text{Am}^2$, TC11A a $1.014 \pm 5\% \mu\text{Am}^2$ y TC11B a $658.9 \pm 5\% \text{nAm}^2$, lo que indica dominancia de Titanomagnetitas pobres en Titanio y la mayoría de ellas fueron las que mostraron direcciones medias características bien agrupadas. Las otras muestras no presentan saturación y sus ciclos son estrechos, lo que indica la presencia de paramagnéticos y Hematitas.

Con los parámetros de magnetización de saturación (M_S), saturación de remanencia (M_{RS}) y coercitividad (H_C) del ciclo de Histéresis y el parámetro de coercitividad de remanencia (H_{CR}) de la IRM, se puede obtener el diagrama de Day (Day et al., 1977) como se describió en el Capítulo V.

VI.2.2.1 Diagrama de Day

El diagrama de Day (Day et al, 1977) definirá el tipo de dominio magnético de cada una de las muestras, como se muestra en la siguiente gráfica.

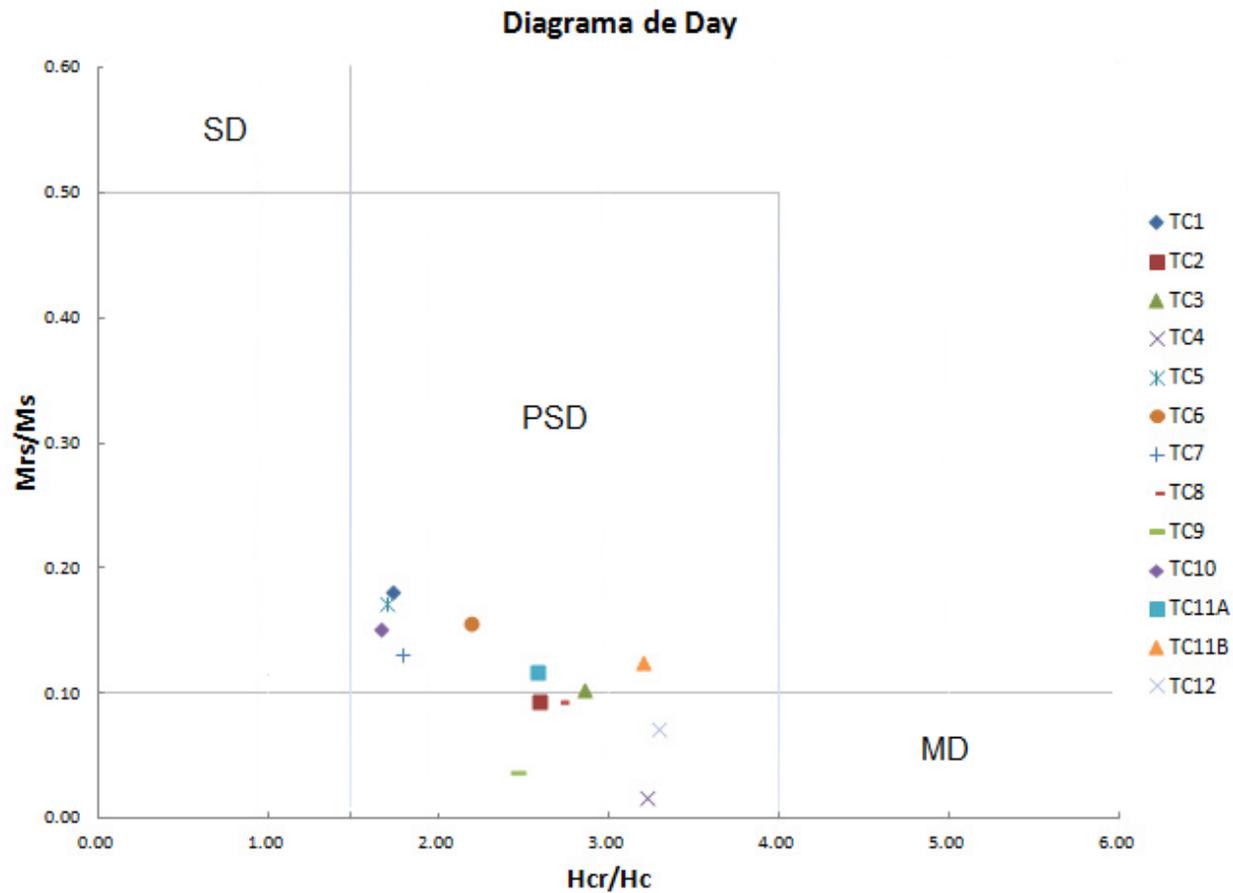


Figura VI.1 Muestra el Diagrama de Day (Day et al., 1977) de las muestras tomadas en Tehuacán en el estado de Puebla.

De acuerdo con el diagrama de Day en la Figura VI.1, se puede observar que las muestras se encuentran localizadas en la zona de pseudo dominio sencillo. De las muestras que fue posible datar, las muestras TC5, TC6, TC7, TC10 y TC11A están más cerca del Dominio Simple, mientras que las muestras TC2, TC9 y TC11B están más cerca del Dominio Múltiple. Podemos observar a excepción de TC2 y TC9, que las muestras TC4, TC8 y TC12 no presentaron un buen registro de la señal magnética, al ser muestras no quemadas podríamos inferir que es posible que sus granos magnéticos presentan grandes dimensiones y por tanto, no registran bien la magnetización detrítica.

VI.2.4 Caracterización de Materiales por Fluorescencia de Rayos X

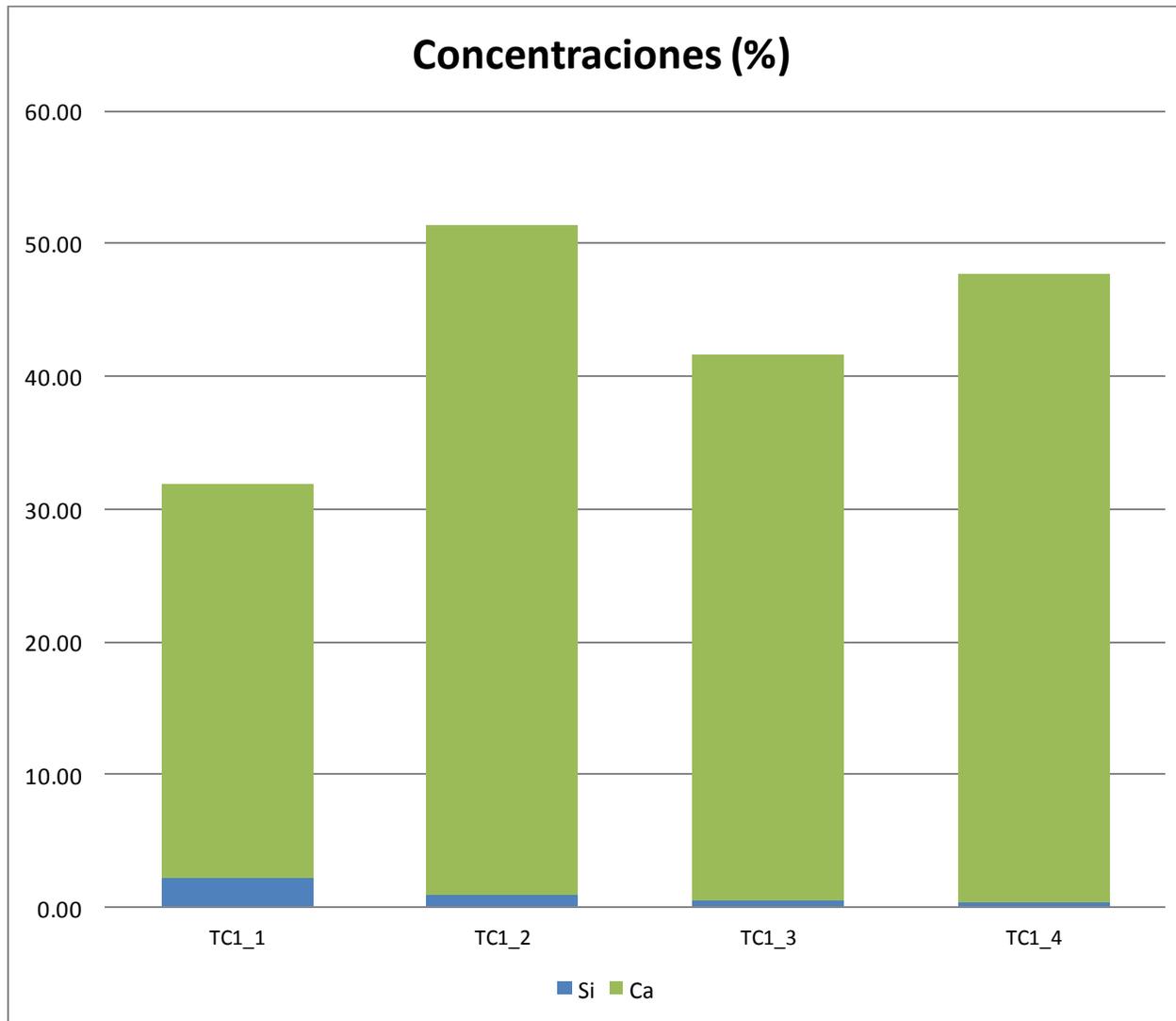
Las concentraciones de las muestras se pueden apreciar en la Tabla VI.19.

Tabla VI.26 Exhibe el material de referencia utilizado para cada espectro así como la concentración de cada muestra.

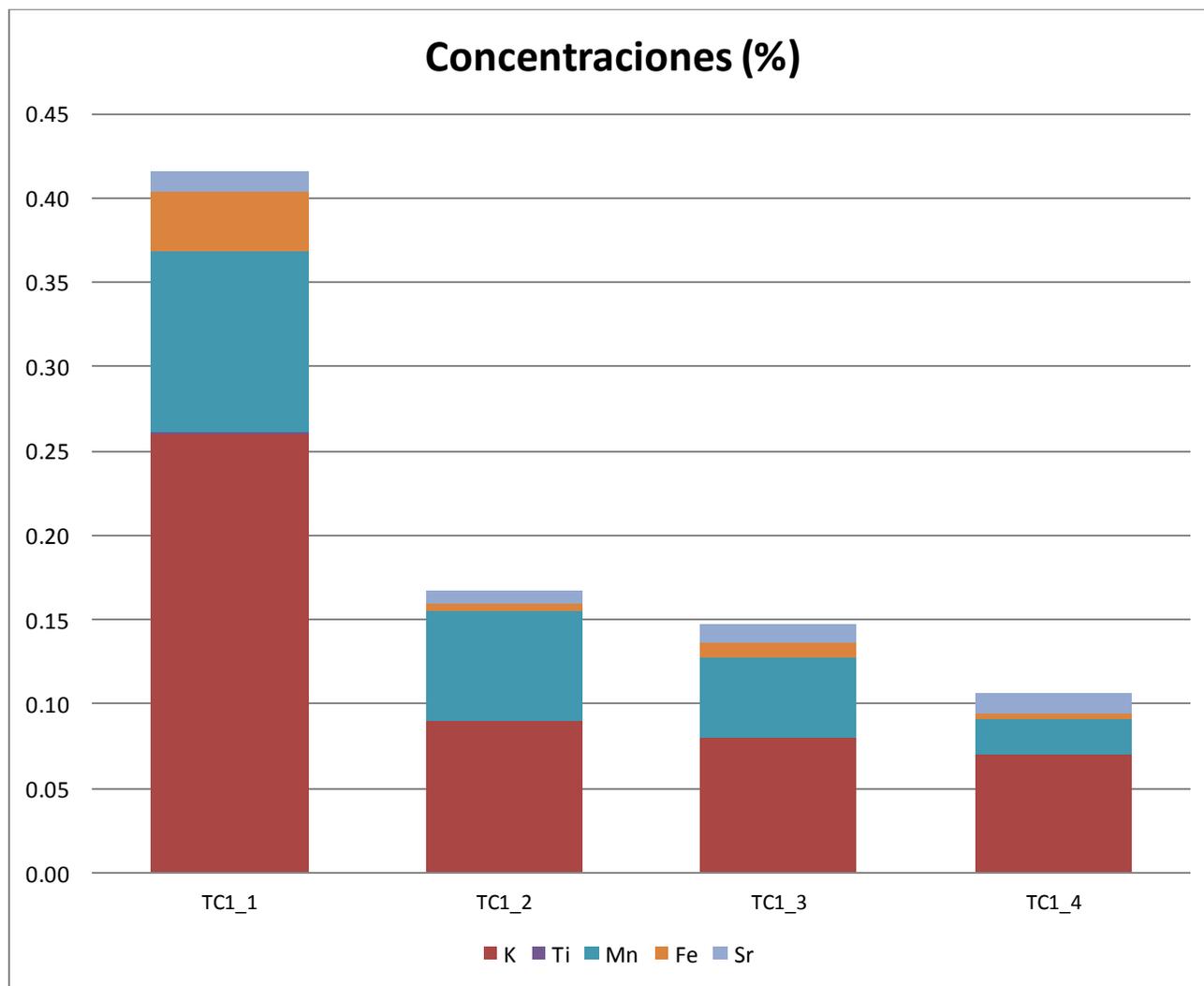
| Muestra | Material de Referencia | Ca (%) ± 15% | Si (%) ± 15% | K (%) ± 20% | Mn (%) ± 20% | Fe (%) ± 15% | Sr (%) ± 20% | Ti (%) ± 20% |
|---------|------------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| TC1_1 | 1d | 29.7 | 2.24 | 0.26 | 0.107 | 0.036 | 0.012 | 0.0010 |
| TC1_2 | 1d | 50.5 | 0.91 | 0.09 | 0.065 | 0.004 | 0.008 | 0.0001 |
| TC1_3 | 1d | 41.2 | 0.49 | 0.08 | 0.047 | 0.009 | 0.011 | 0.0003 |
| TC1_4 | 1d | 47.4 | 0.35 | 0.07 | 0.021 | 0.003 | 0.012 | 0.0001 |
| TC2_1 | 1d | 33.3 | 1.16 | 0.07 | 0.036 | 0.006 | 0.014 | 0.0002 |
| TC2_2 | IGLGB3 | 6.08 | 23.6 | 0.07 | 0.005 | 0.380 | 0.044 | 0.0350 |
| TC2_3 | 1d | 25.1 | 1.20 | 0.07 | 0.024 | 0.006 | 0.011 | 0.0003 |
| TC2_4 | 1d | 49.6 | 0.34 | 0.07 | 0.019 | 0.002 | 0.010 | 0.0002 |
| TC3_1 | 1d | 47.9 | 0.72 | 0.11 | 0.047 | 0.009 | 0.008 | 0.0002 |
| TC3_2 | 1d | 26.3 | 1.13 | 0.08 | 0.049 | 0.015 | 0.020 | 0.0012 |
| TC3_3 | 1d | 23.3 | 0.99 | 0.13 | 0.074 | 0.032 | 0.009 | 0.0006 |
| TC3_4 | 1d | 29.3 | 2.34 | 0.25 | 0.060 | 0.024 | 0.012 | 0.0009 |
| TC4_1 | 1d | 34.4 | 0.98 | 0.16 | 0.063 | 0.021 | 0.023 | 0.0004 |
| TC4_2 | 1d | 31.1 | 2.46 | 0.26 | 0.090 | 0.035 | 0.021 | 0.0012 |
| TC4_3 | 1d | 34.8 | 1.66 | 0.20 | 0.069 | 0.024 | 0.018 | 0.0008 |
| TC4_4 | 1d | 31.8 | 0.48 | 0.10 | 0.040 | 0.008 | 0.010 | 0.0002 |
| TC5_1 | IGLGB3 | 11.3 | 1.79 | 1.02 | 0.021 | 1.030 | 0.219 | 0.0690 |
| TC5_2 | IGLGB3 | 13.6 | 1.90 | 1.00 | 0.014 | 0.740 | 0.198 | 0.0620 |

| | | | | | | | | |
|----------------|--------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| TC5_3 | 1d | 31.6 | 0.29 | 0.11 | 0.042 | 0.013 | 0.017 | 0.0005 |
| TC5_4 | 1d | 45.9 | 0.13 | 0.05 | 0.021 | 0.000 | 0.023 | 0.0000 |
| TC6_1 | 1d | 29.5 | 1.33 | 0.17 | 0.084 | 0.027 | 0.012 | 0.0010 |
| TC6_2 | 1d | 22.0 | 2.86 | 0.31 | 0.120 | 0.069 | 0.010 | 0.0034 |
| TC6_3 | 1d | 39.3 | 1.00 | 0.10 | 0.056 | 0.011 | 0.012 | 0.0002 |
| TC6_4 | IGLGB3 | 12.6 | 8.88 | 1.43 | 0.024 | 1.080 | 0.156 | 0.0960 |
| TC7_1 | IGLGB3 | 9.77 | 26.5 | 0.32 | 0.009 | 0.160 | 0.081 | 0.0210 |
| TC7_2 | IGLGB3 | 12.4 | 11.2 | 1.80 | 0.030 | 1.340 | 0.210 | 0.1480 |
| TC7_3 | 1d | 20.5 | 3.04 | 0.09 | 0.044 | 0.010 | 0.009 | 0.0004 |
| TC8_1 | 1d | 47.3 | 0.14 | 0.07 | 0.037 | 0.003 | 0.018 | 0.0000 |
| TC8_2 | 1d | 32.6 | 0.95 | 0.11 | 0.055 | 0.018 | 0.015 | 0.0004 |
| TC8_3 | 1d | 26.3 | 2.33 | 0.25 | 0.146 | 0.050 | 0.013 | 0.0021 |
| TC8_4 | 1d | 26.0 | 1.70 | 0.12 | 0.101 | 0.047 | 0.010 | 0.0012 |
| TC9_1 | 1d | 29.4 | 1.70 | 0.19 | 0.082 | 0.027 | 0.017 | 0.0010 |
| TC9_2 | 1d | 35.1 | 0.62 | 0.07 | 0.044 | 0.013 | 0.012 | 0.0003 |
| TC9_3 | IGLGB3 | 2.96 | 37.0 | 0.49 | 0.000 | 0.210 | 0.000 | 0.0000 |
| TC10_1 | 1d | 21.1 | 2.33 | 0.25 | 0.118 | 0.044 | 0.011 | 0.0014 |
| TC10_2 | 1d | 30.8 | 0.00 | 0.03 | 0.000 | 0.000 | 0.014 | 0.0000 |
| TC10_3 | 1d | 41.0 | 0.71 | 0.12 | 0.028 | 0.010 | 0.010 | 0.0005 |
| TC11A_1 | 1d | 23.0 | 1.71 | 0.24 | 0.064 | 0.028 | 0.017 | 0.0012 |
| TC11A_2 | 1d | 28.5 | 1.78 | 0.13 | 0.061 | 0.010 | 0.008 | 0.0005 |
| TC11A_3 | 1d | 33.4 | 0.46 | 0.09 | 0.000 | 0.013 | 0.012 | 0.0003 |
| TC11B_1 | 1d | 25.6 | 1.22 | 0.17 | 0.079 | 0.018 | 0.015 | 0.0005 |
| TC11B_2 | 1d | 34.9 | 1.37 | 0.24 | 0.105 | 0.025 | 0.011 | 0.0070 |
| TC11B_3 | IGLGB3 | 5.25 | 17.0 | 1.66 | 0.037 | 1.280 | 0.046 | 0.0910 |
| TC12_1 | 1d | 27.5 | 1.81 | 0.26 | 0.084 | 0.039 | 0.014 | 0.0023 |
| TC12_2 | 1d | 40.7 | 1.34 | 0.09 | 0.047 | 0.005 | 0.013 | 0.0000 |
| TC12_3 | 1d | 26.0 | 1.20 | 0.15 | 0.131 | 0.016 | 0.011 | 0.0005 |

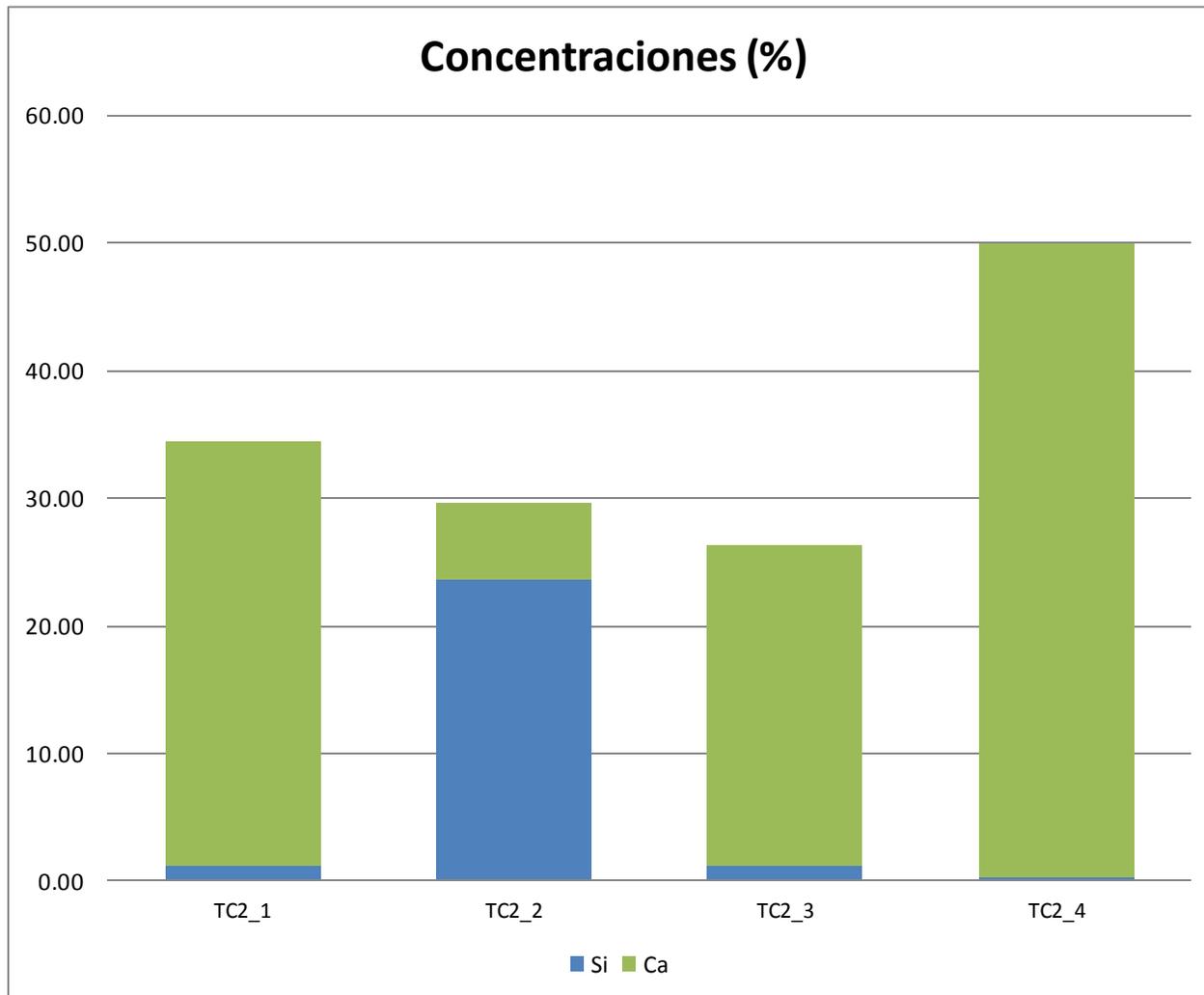
Obtenidas las concentraciones de cada elemento, para cada muestra se obtuvieron dos gráficas: una de elementos menores y una de elemento mayores para visualizar de manera adecuada la composición elemental. Los resultados se exhiben en las siguientes gráficas.



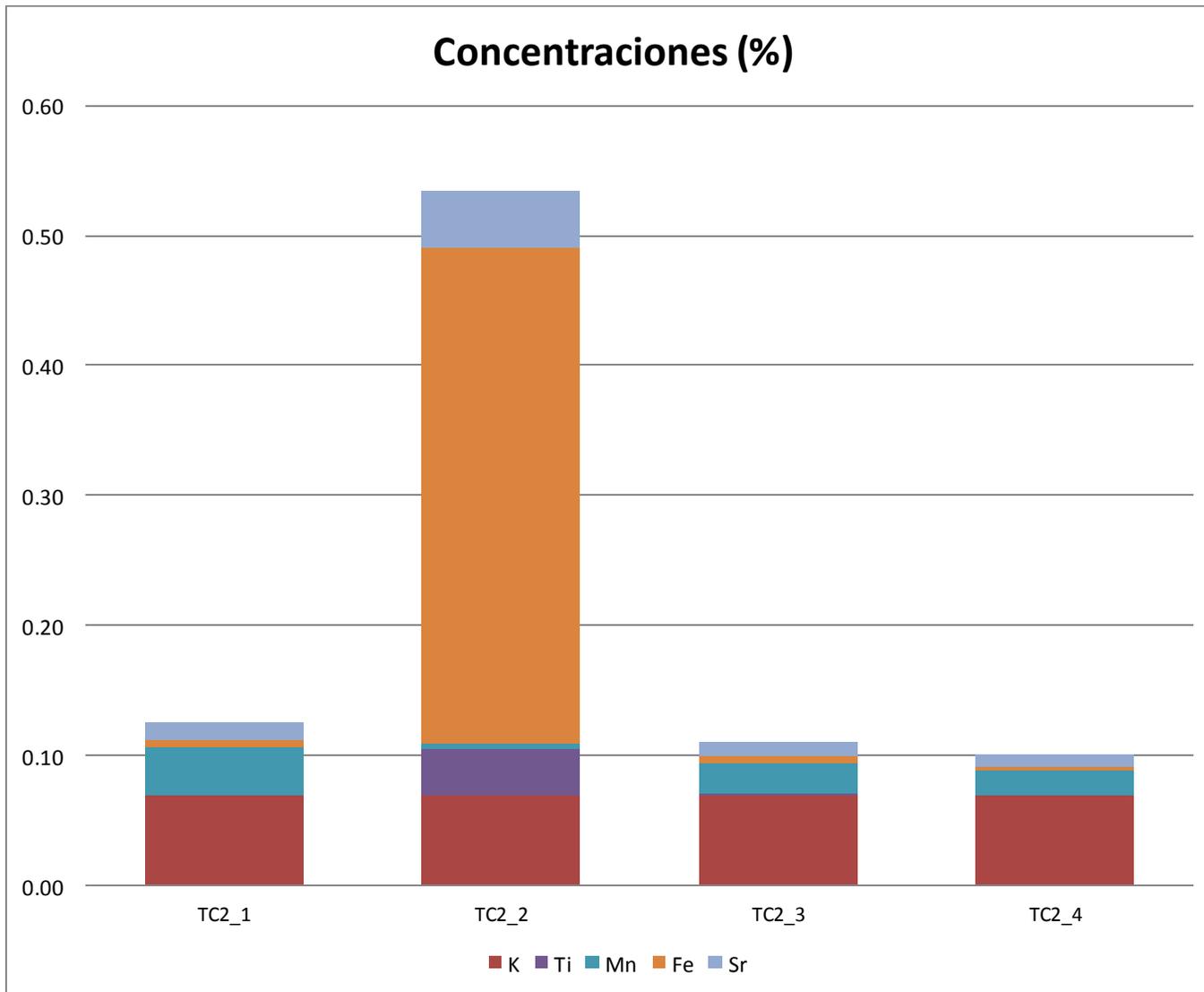
Gráfica VI.1 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC1 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



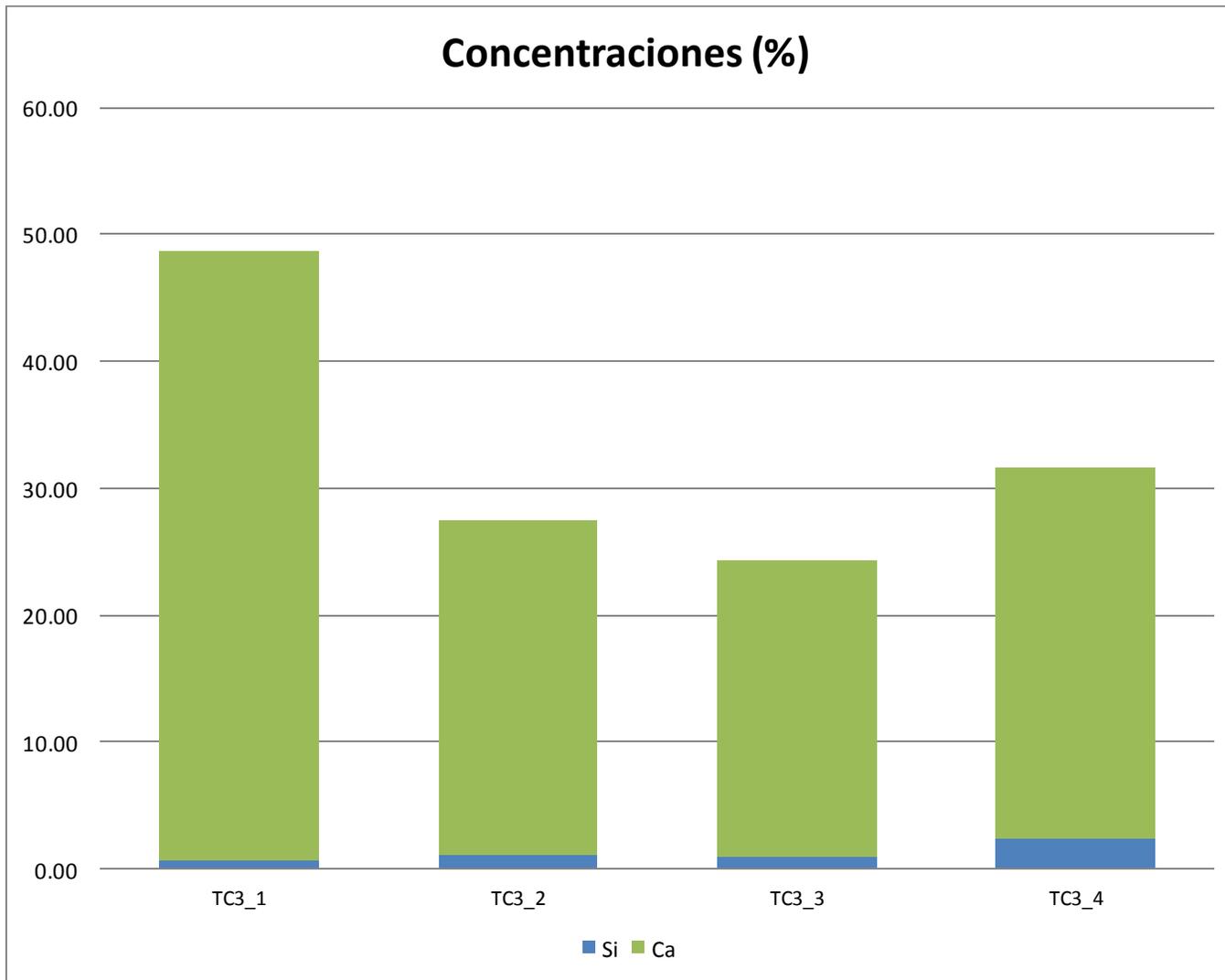
Gráfica VI.2 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC1 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



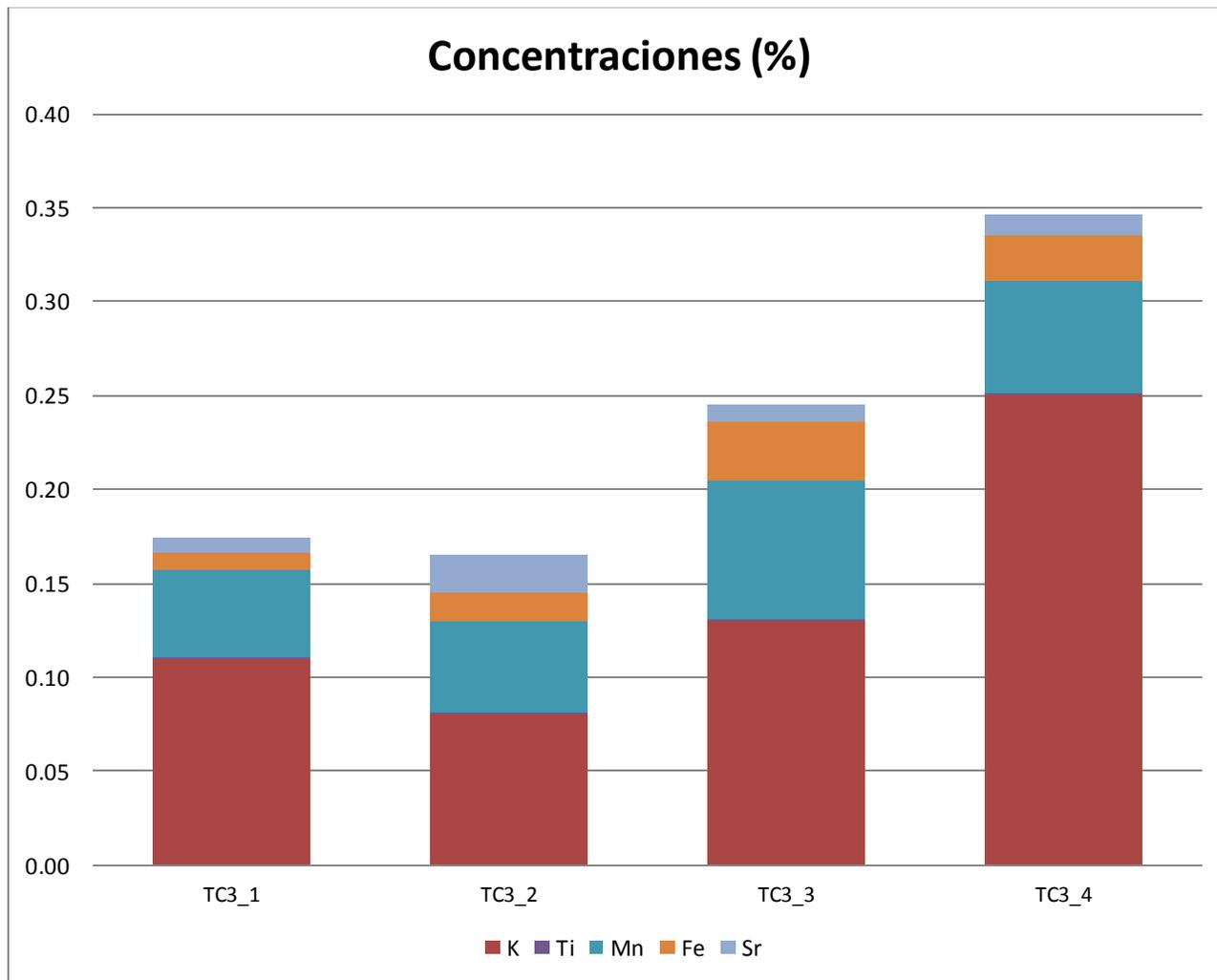
Gráfica VI.3 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC2 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



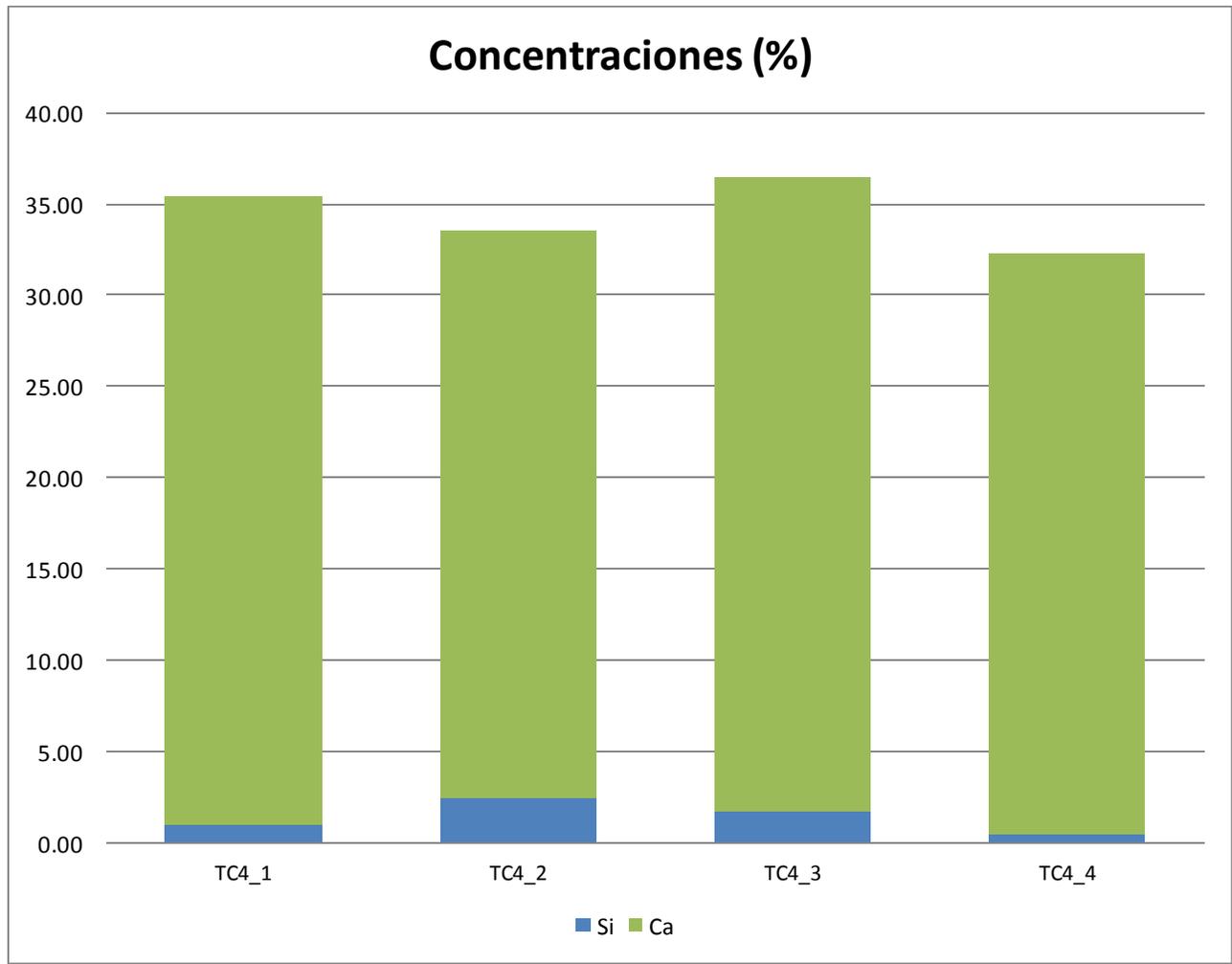
Gráfica VI.4 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC2 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



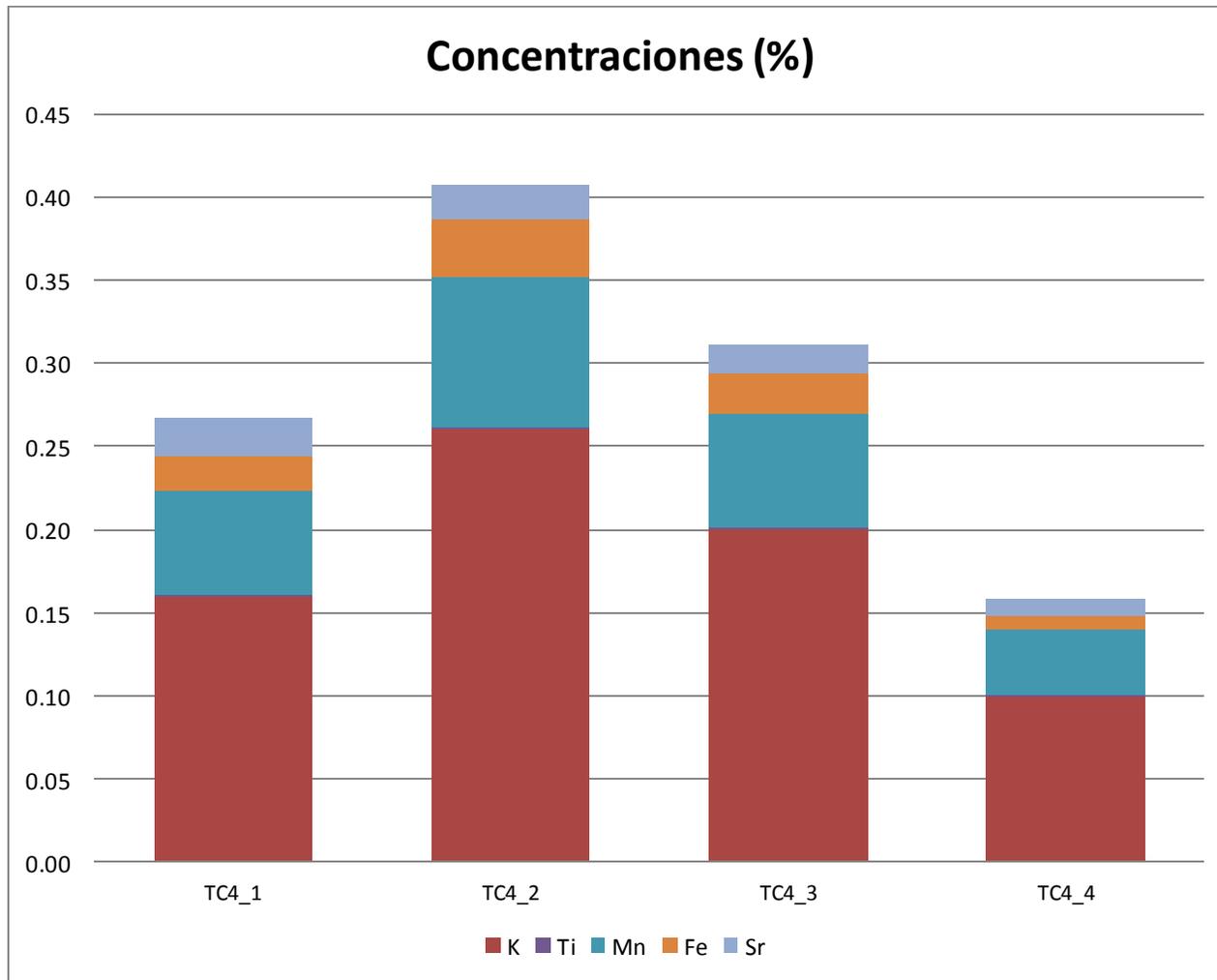
Gráfica VI.5 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC3 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



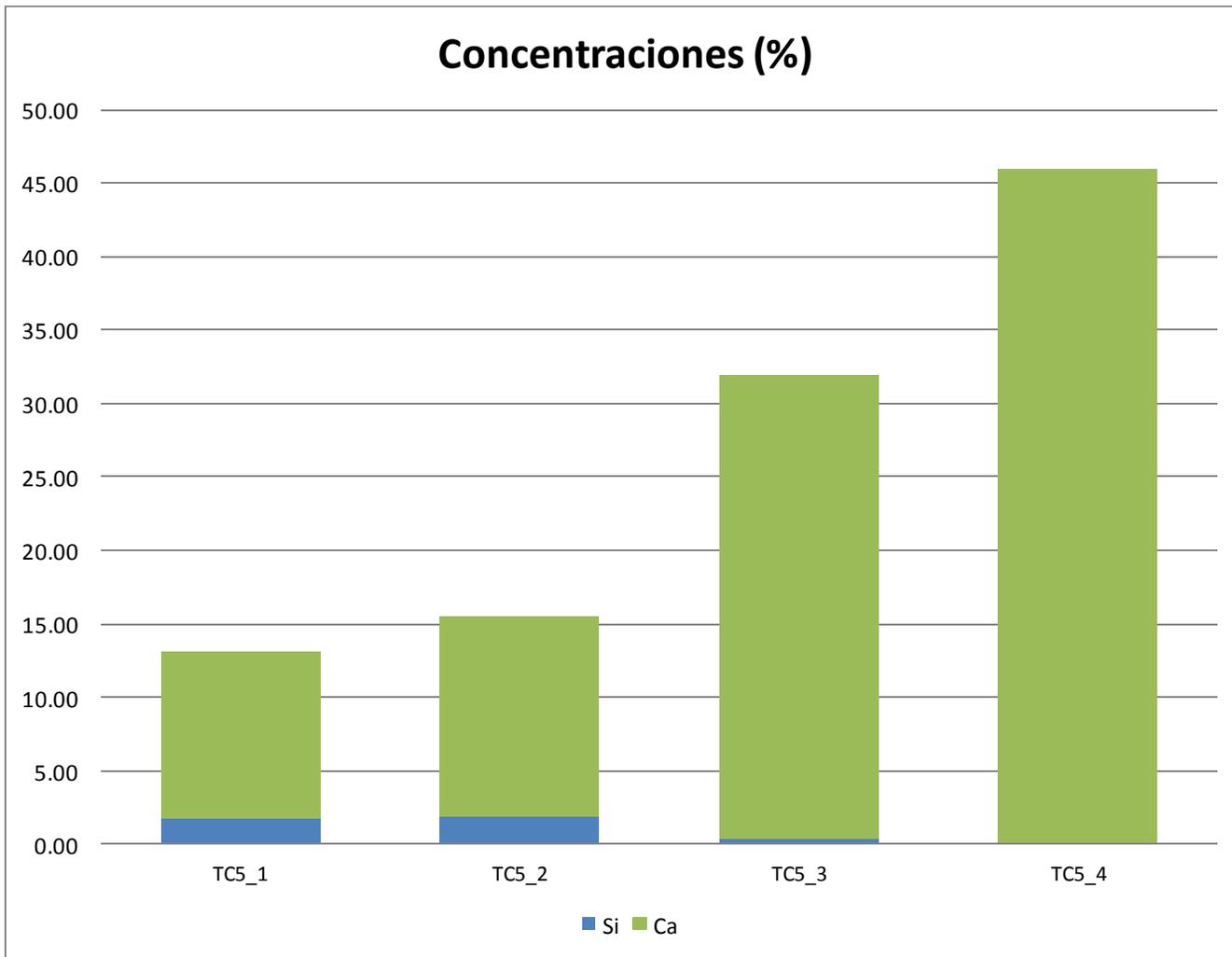
Gráfica VI.6 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC3 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



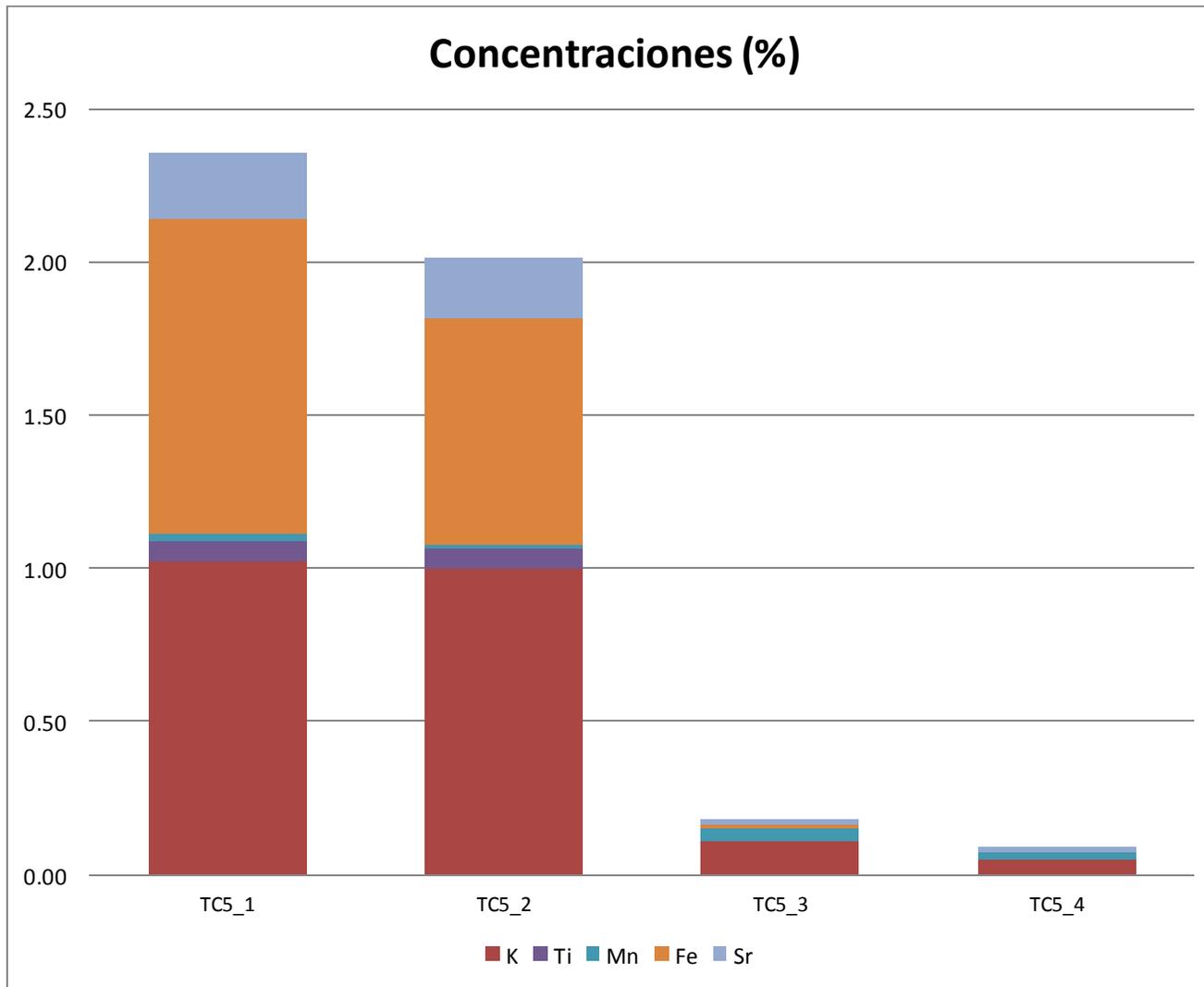
Gráfica VI.7 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC4 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



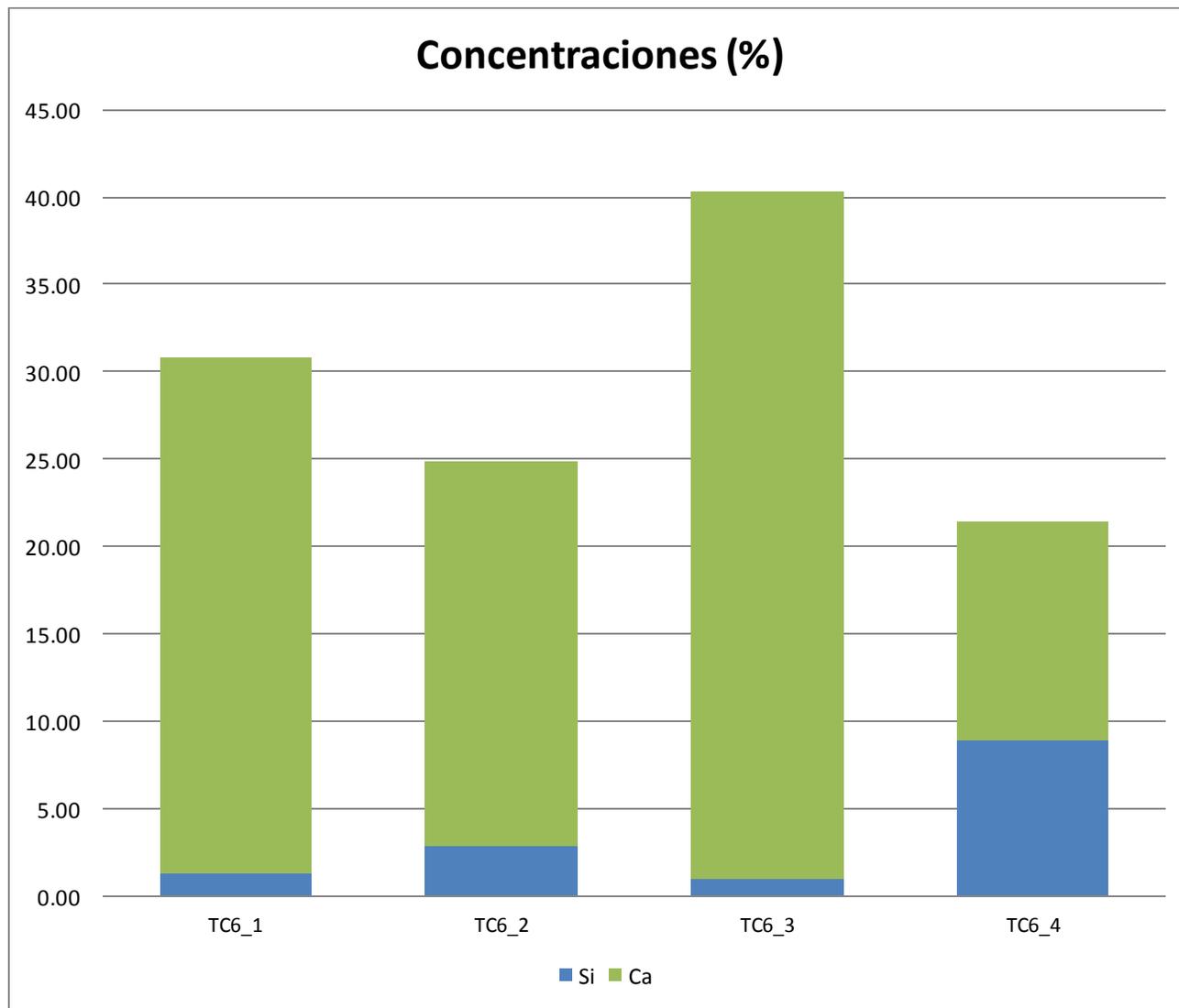
Gráfica VI.8 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC4 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



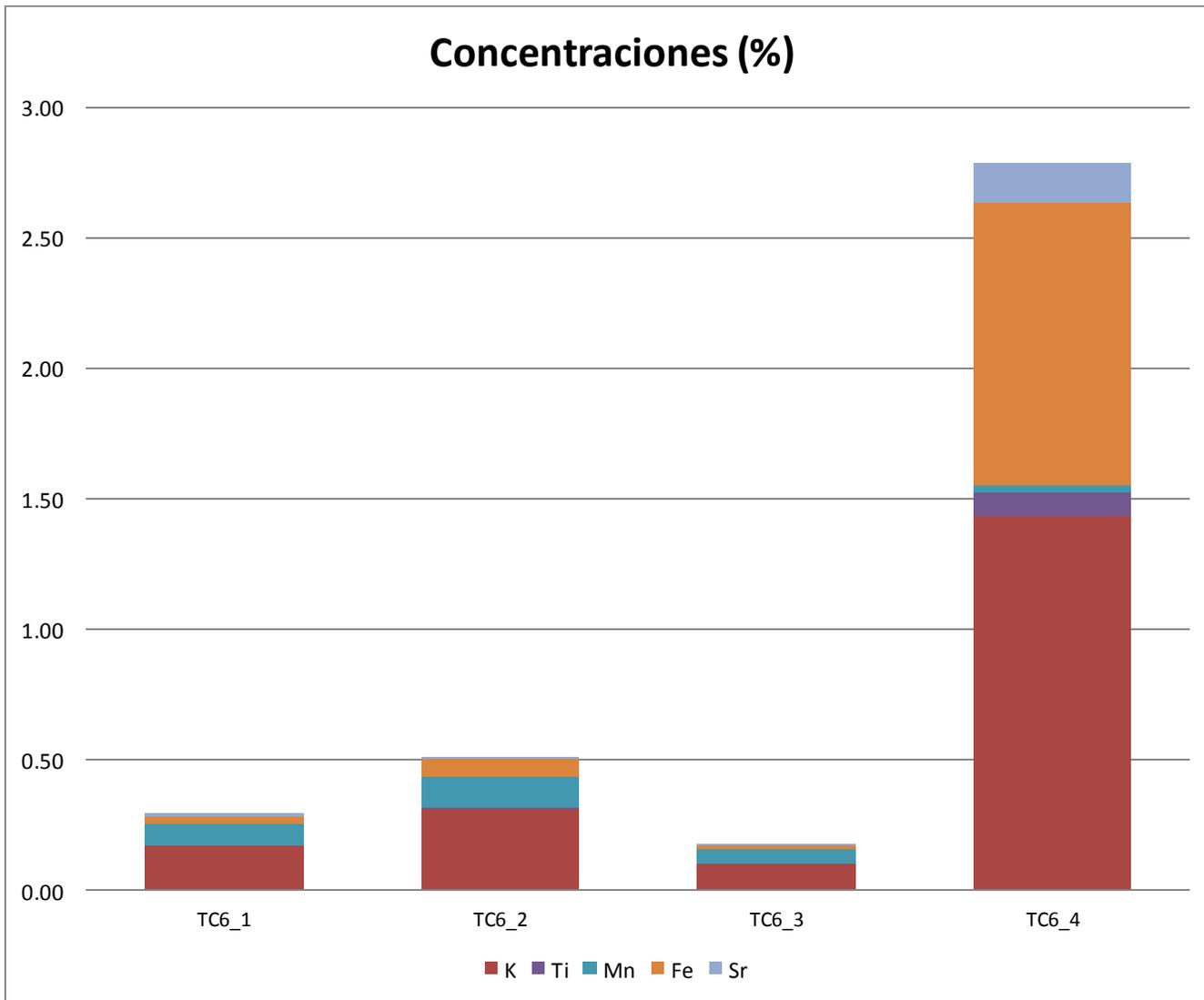
Gráfica VI.9 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC5 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



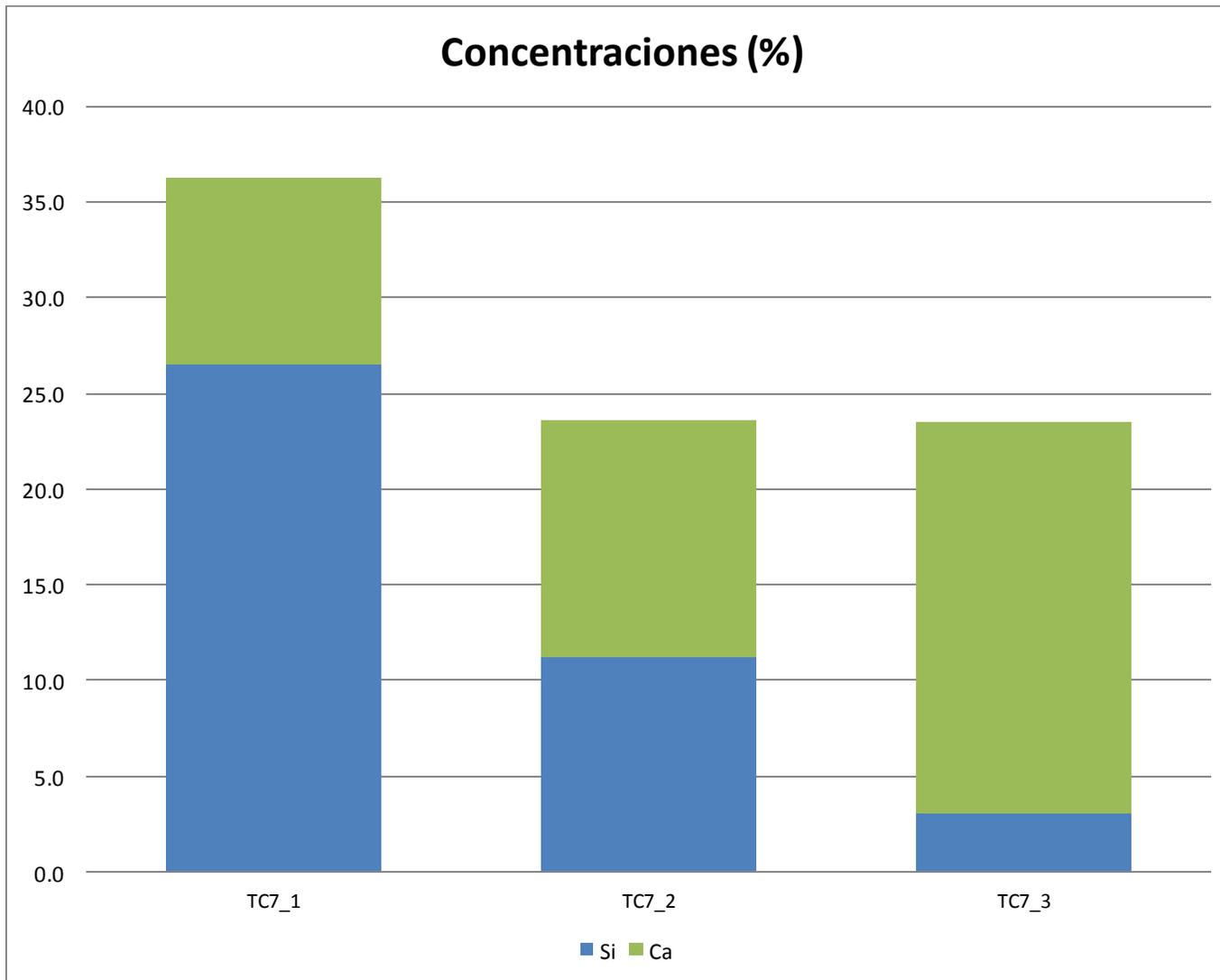
Gráfica VI.10 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC5 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



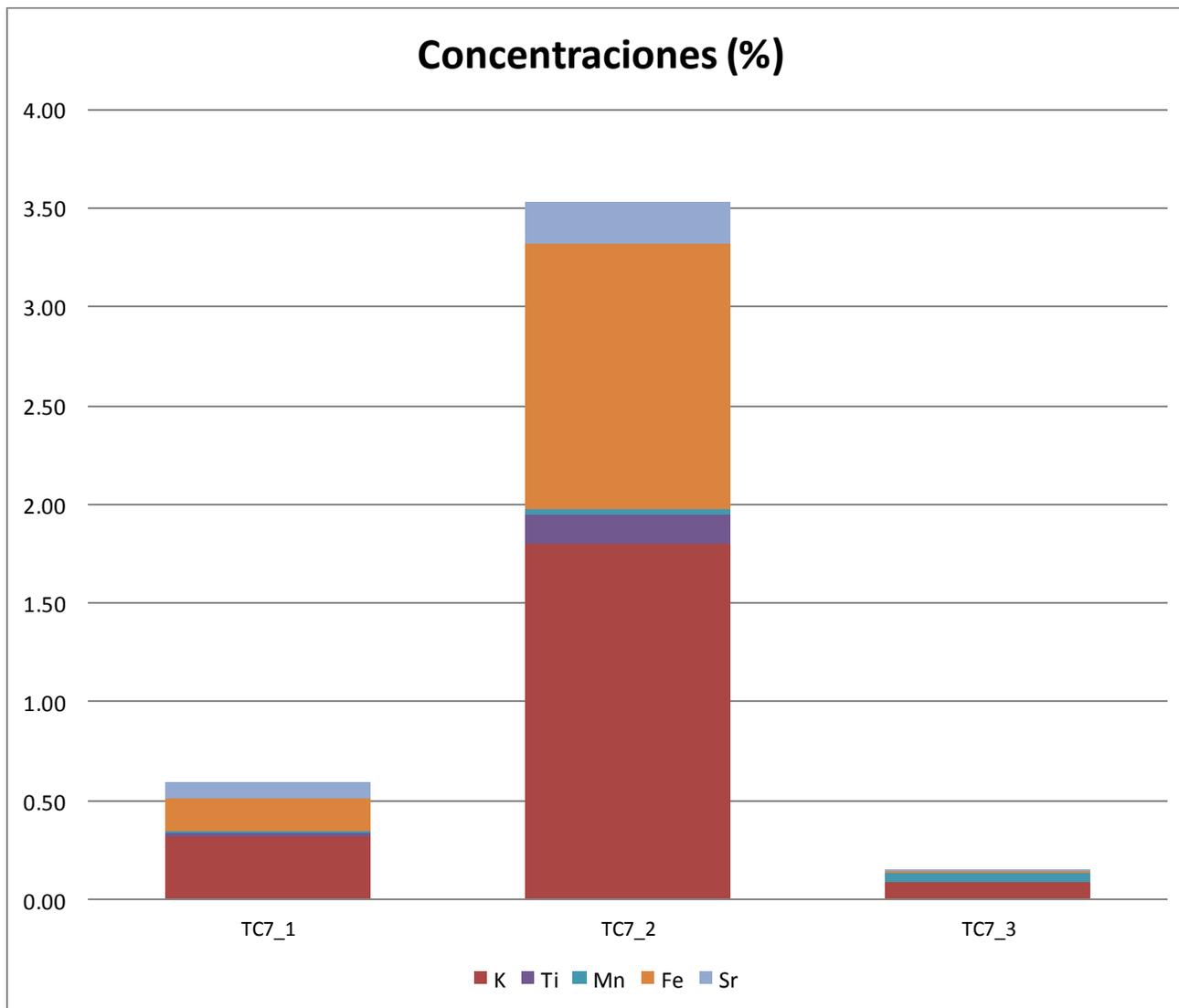
Gráfica VI.11 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC6 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



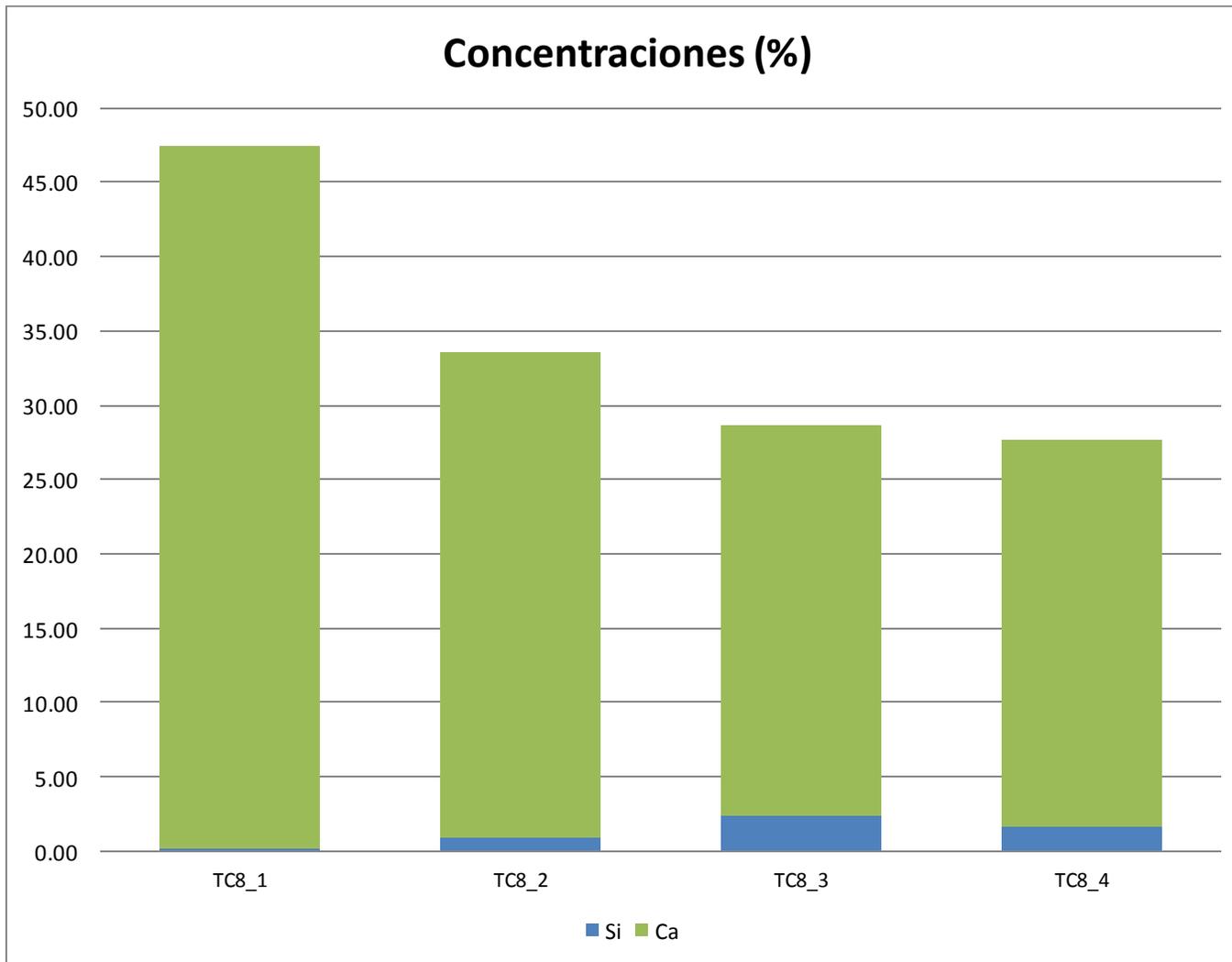
Gráfica VI.12 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC6 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



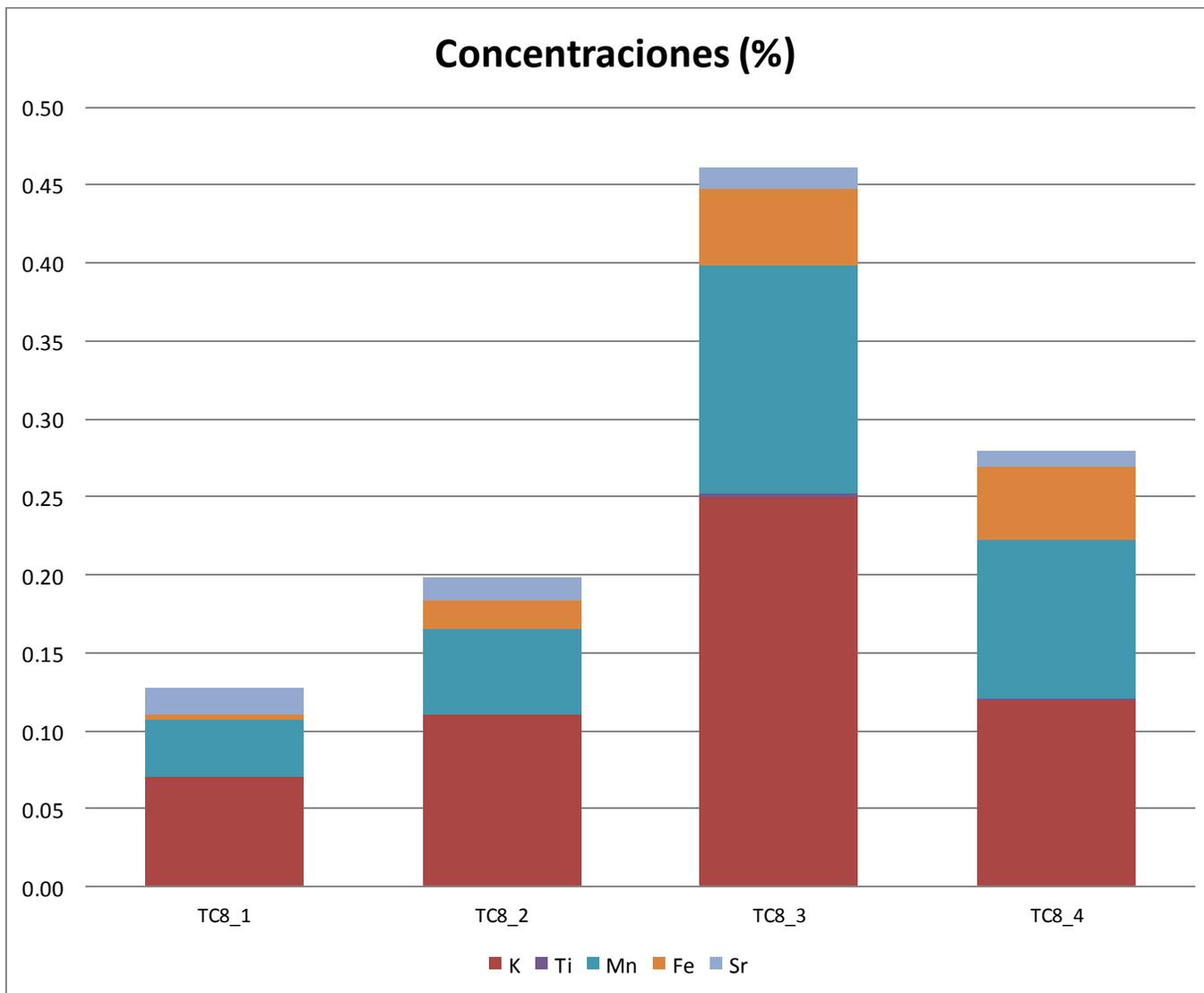
Gráfica VI.13 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC7 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



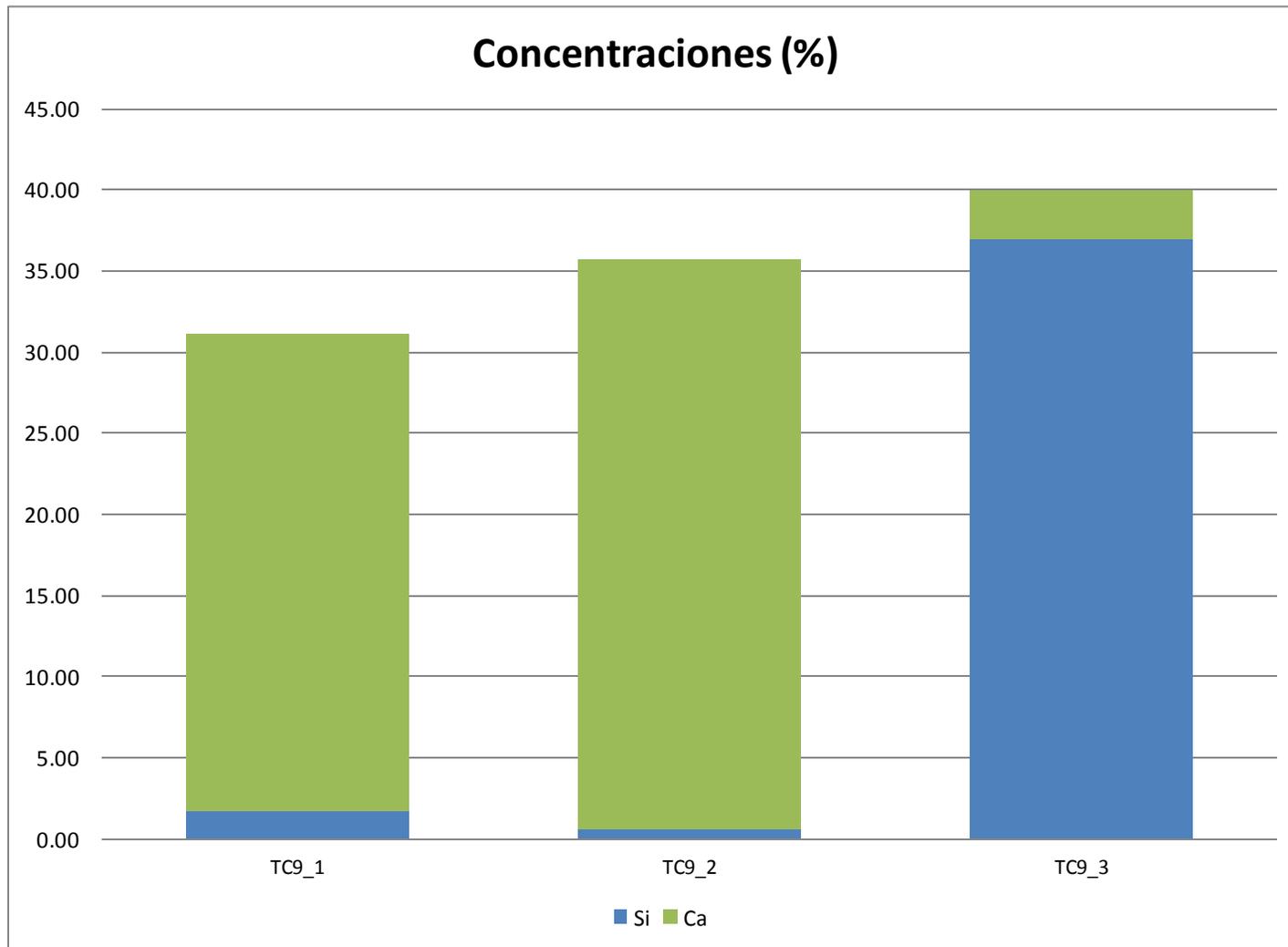
Gráfica VI.14 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC7 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



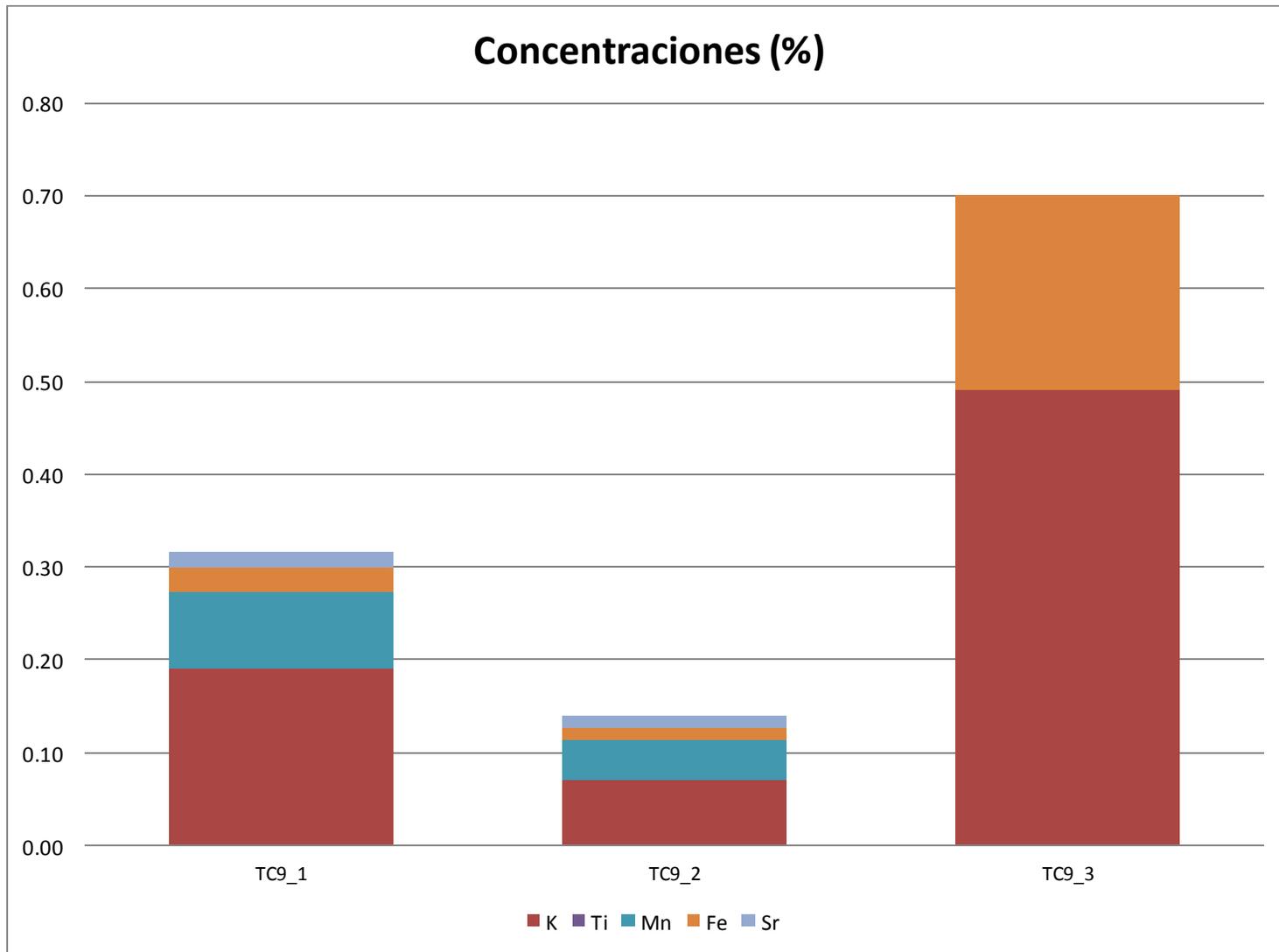
Gráfica VI.15 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC8 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



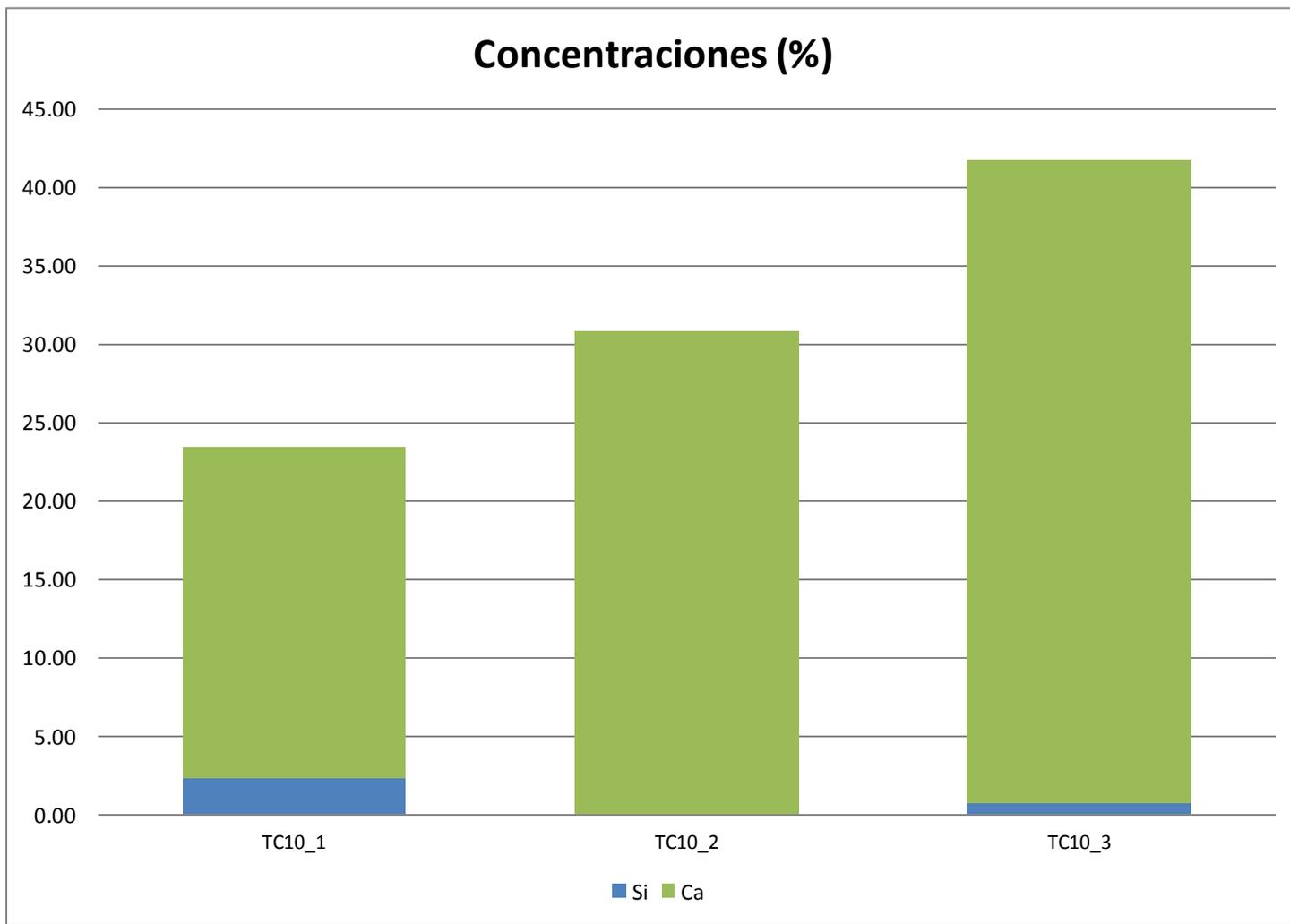
Gráfica VI.16 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC8 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



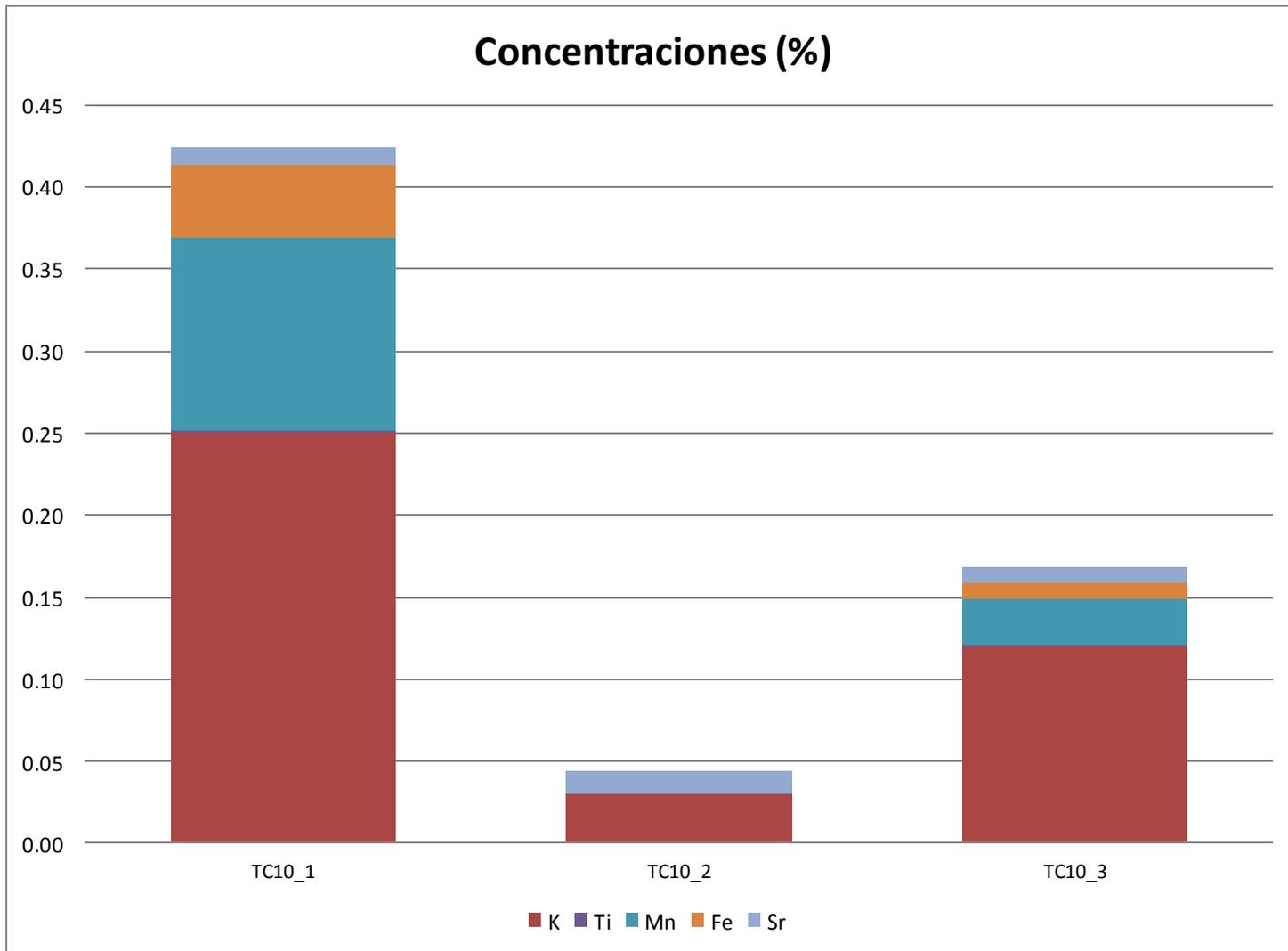
Gráfica VI.17 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC9 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



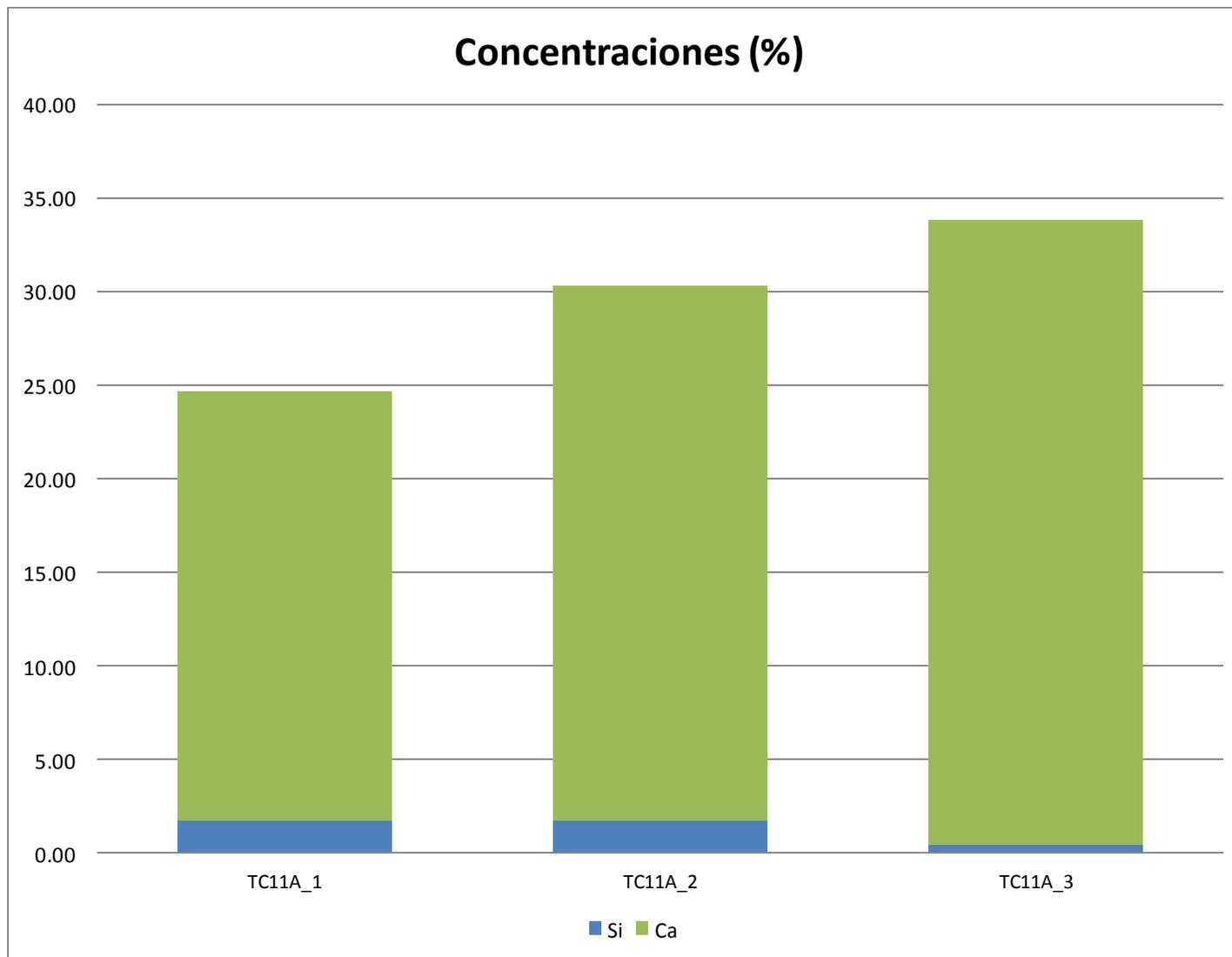
Gráfica VI.18 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC9 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



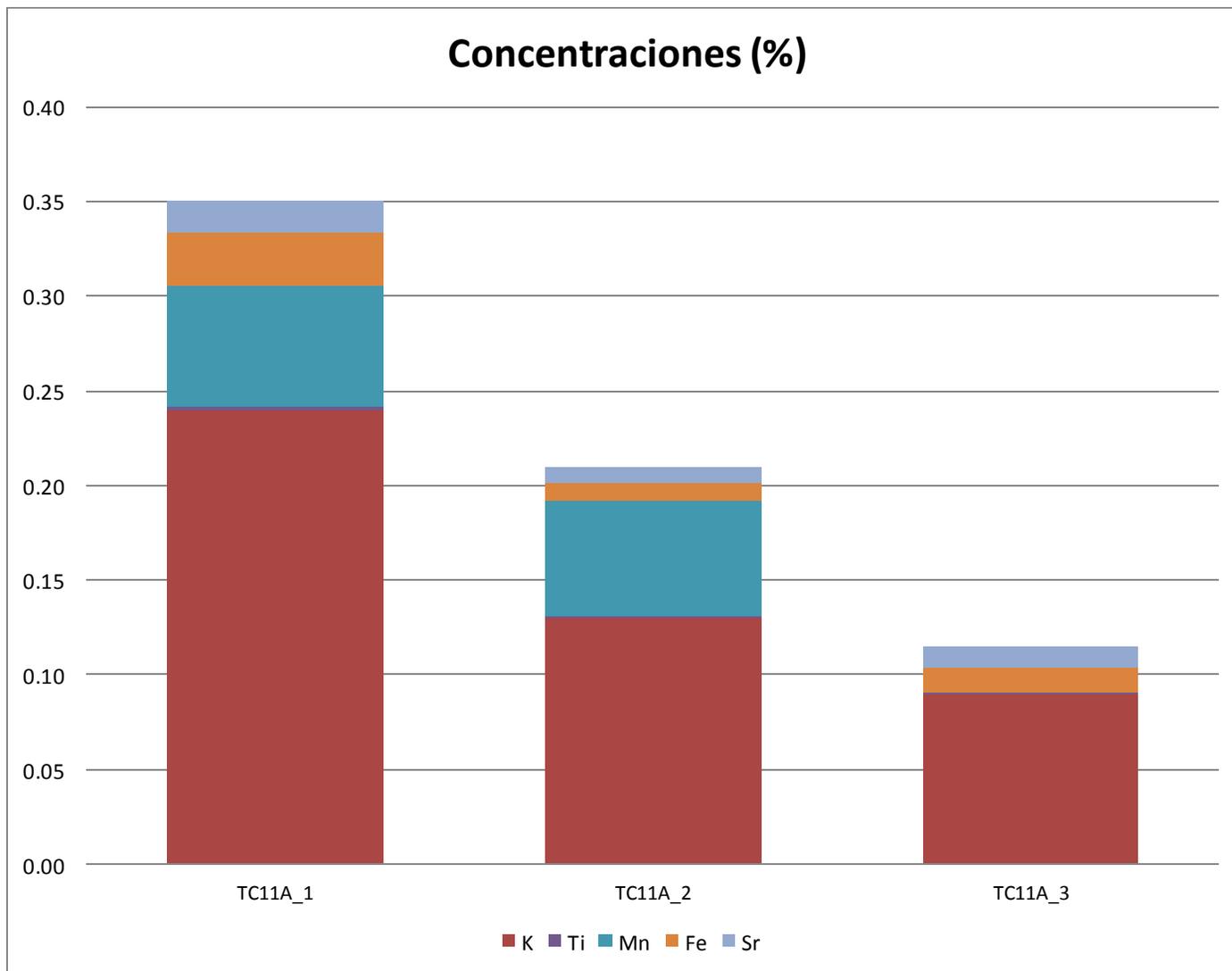
Gráfica VI.19 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC10 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



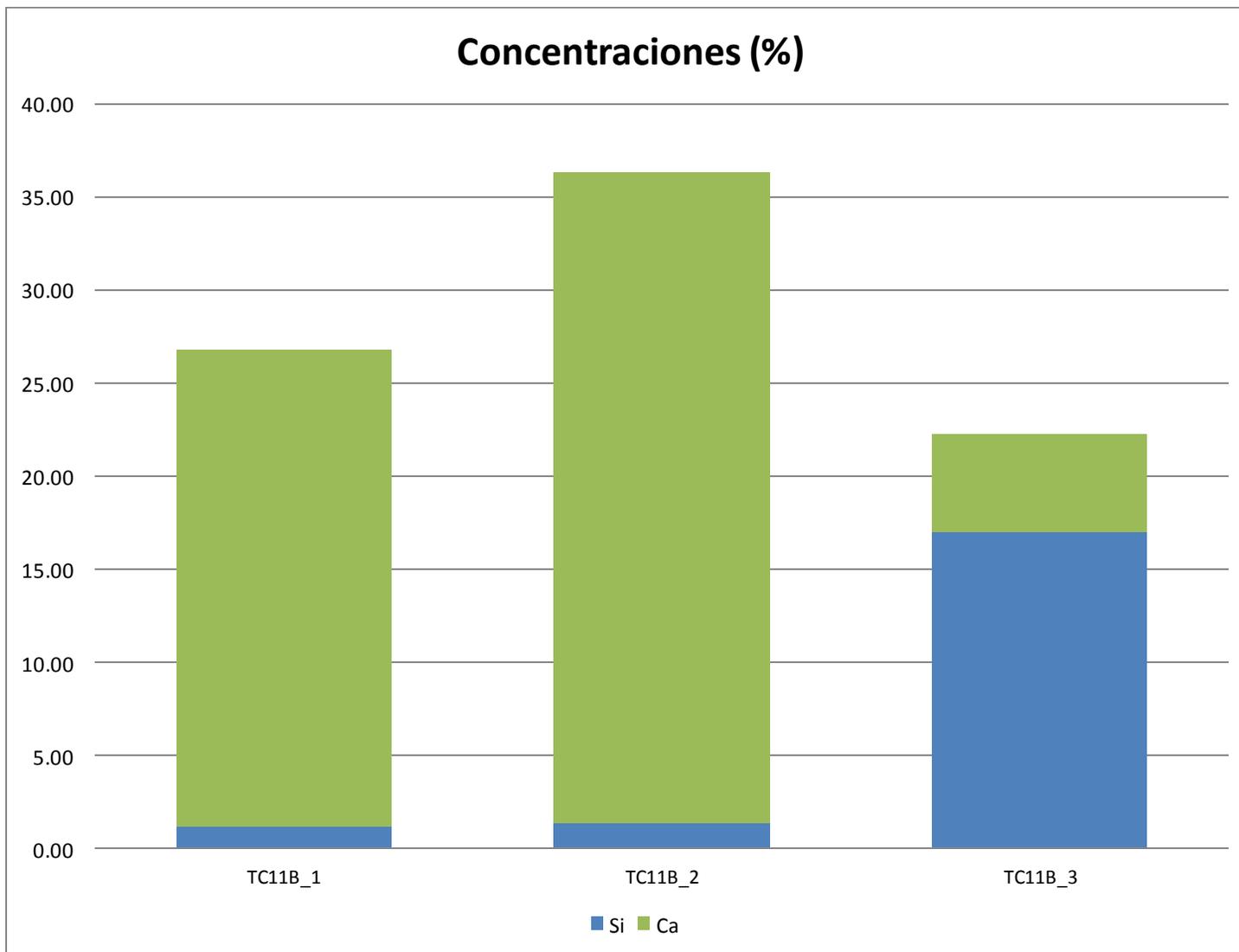
Gráfica VI.20 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC10 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



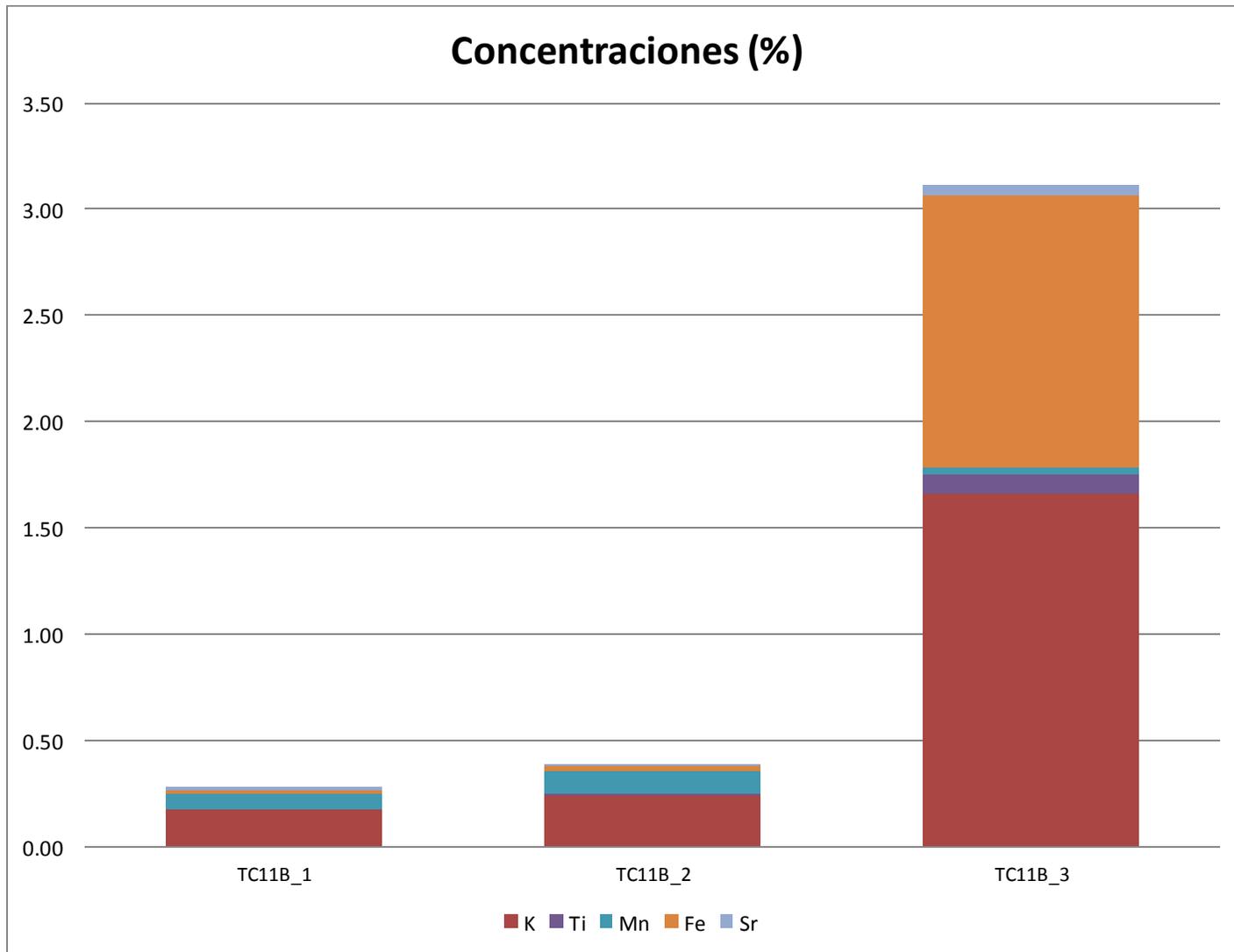
Gráfica VI.21 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC11A obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



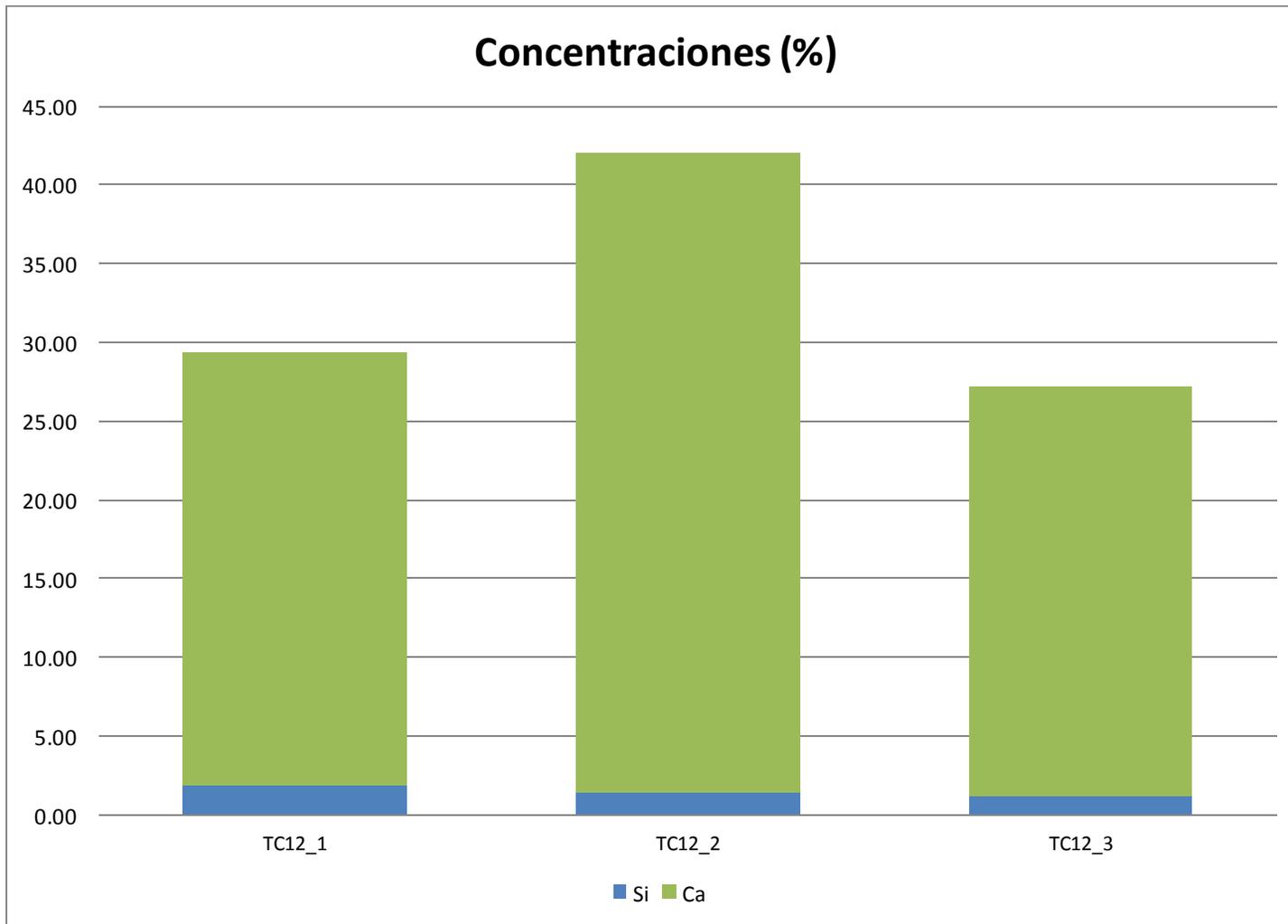
Gráfica VI.22 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC11A obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



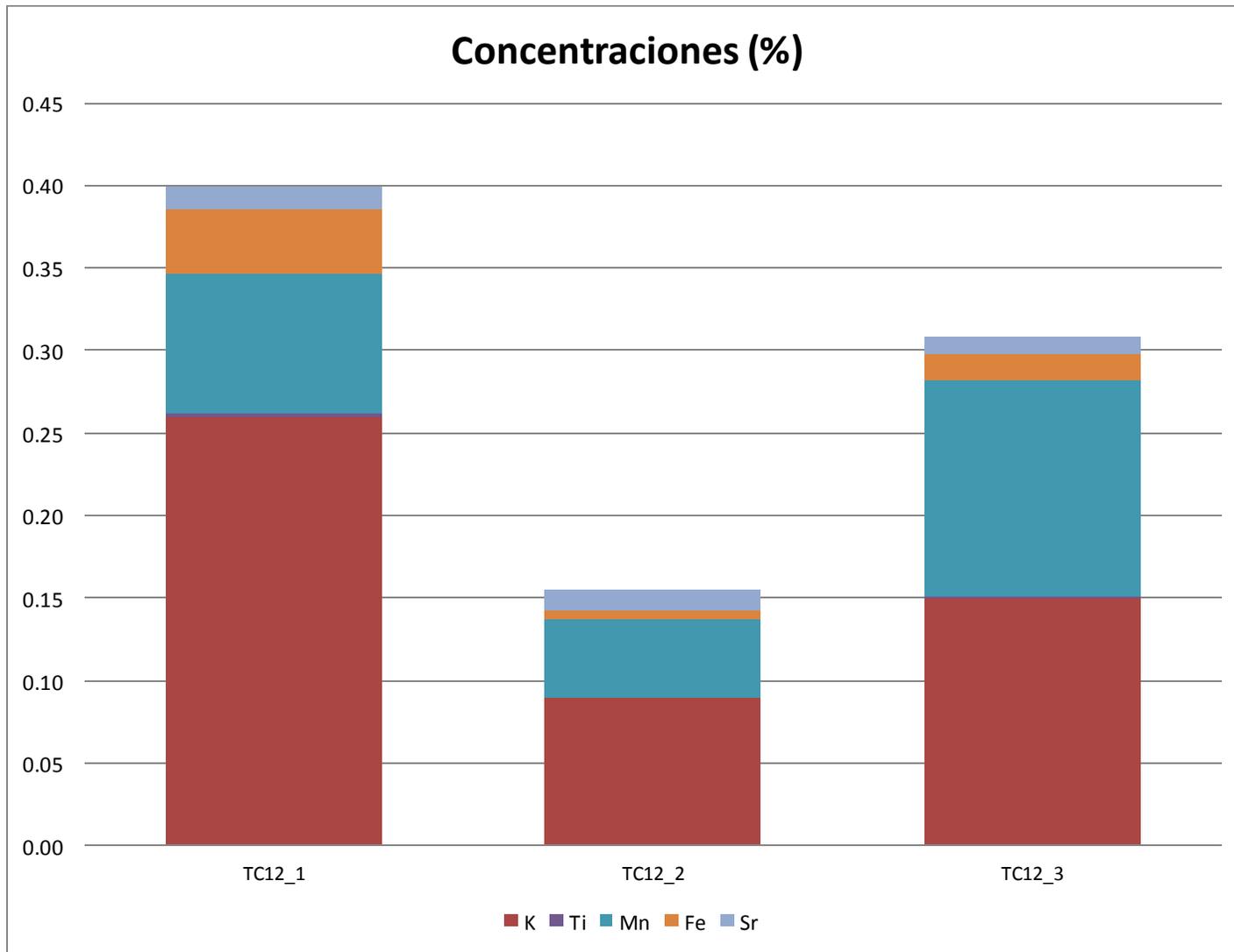
Gráfica VI.23 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC11B obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



Gráfica VI.24 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC11B obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.



Gráfica VI.25 Exhibe las concentraciones de los elementos mayores de la muestra TC12 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.

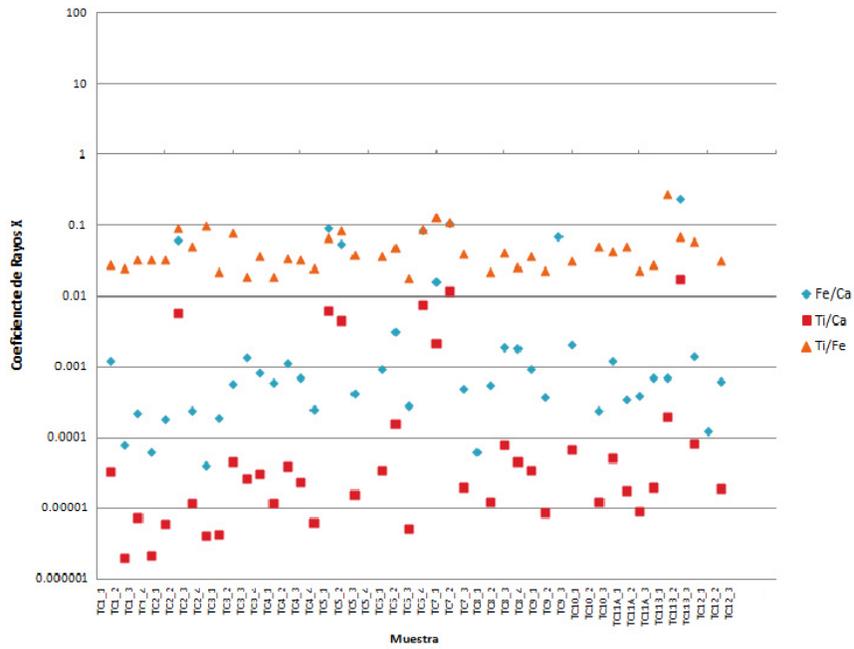


Gráfica VI.26 Exhibe las concentraciones de los elementos menores de la muestra TC12 obtenidas en SANDRA del IF-UNAM.

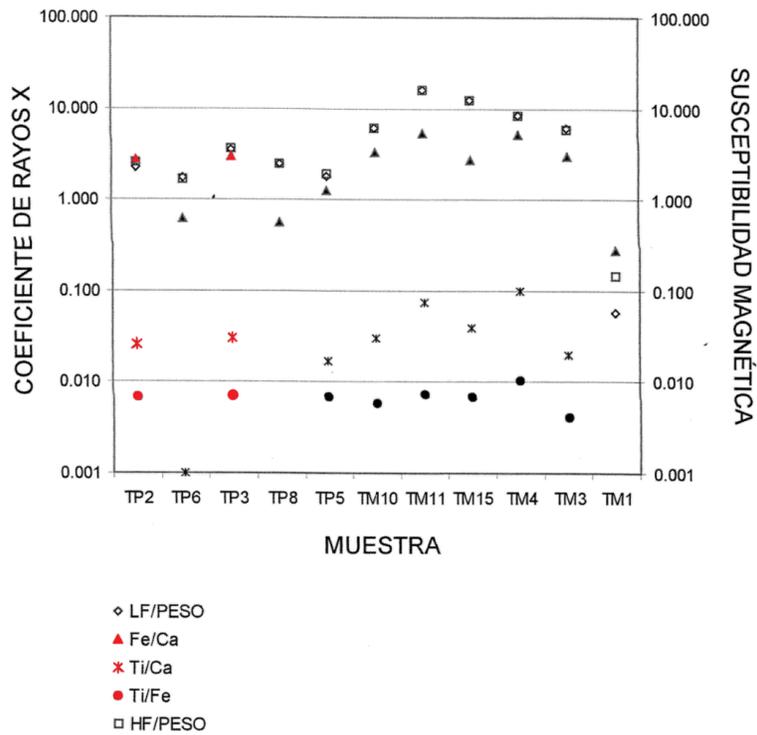
Esta técnica de análisis de materiales fue utilizada como una ayuda para inferir posibles causas de un buen o mal registro de la magnetización.

En general, en las concentraciones obtenidas se observa un bajo contenido de material magnético (compuesto de Fe y Ti) y un alto contenido de Calcio respecto a los demás elementos. Para las muestras los contenidos de Fe solo son superiores al 1 wt% en 4 casos (TC5 en zona color negro, TC6 en zona color negro, TC7 en zona café oscuro y TC11B en zona color negro), y en tres casos superiores al 0.2 wt% (TC2 en zona café oscuro, TC5 en zona café oscuro y TC9 en zona café oscura), en la mayoría de los casos son inferiores al 0.1 wt%. Para el Ti solo en un caso es superior al 0.1 wt% (TC7 en zona café oscuro) y en los demás casos es inferior al 0.09 wt%. Mientras que el Calcio es superior al 50 wt% en un caso (TC1 en zona café oscuro), y en 32 casos es superior al 25 wt%, y en la minoría inferiores al 25 wt% (TC2 en zona café oscura, TC5 en zona color negro, TC5 en zona café oscuro, TC6 en zona café oscuro, TC6 en zona color negro, TC7 en zona color negro, TC7 en zona café oscuro, TC9 en zona café oscura, TC11A en zona blanca y TC11B en zona color negro).

Esto se puede observar en la gráfica VI.27 realizada para las concentraciones de Ndachjian Tehuacán para muestras no quemadas, análogamente en la gráfica VI.28 realizada para el sitio Teopancazco (Hueda, 2000) se puede observar valores superiores en las concentraciones de las muestras TP2 y TP3 (remarcadas en rojo) probablemente debido a que son muestras quemadas.



Gráfica VI.27 Exhibe los resultados de XRF de Ndachjian Tehuacán.



Gráfica VI.28 Exhibe los resultados de PIXE y susceptibilidad magnética para muestras de Teopanazgo y Templo Mayor (Hueda, 2000).

También se debe notar que aunque la técnica de análisis de materiales por PIXE es similar a XRF y sus resultados son comparables para los elementos de interés de este trabajo (Fe, Ti). La diferencia estriba en que PIXE es más sensible debido al uso de varios detectores en el dispositivo experimental y que los elementos ligeros se miden con mayor precisión dado que la probabilidad de emisión de rayos X inducida por protones es más alta para elementos ligeros. Para ambas técnicas es necesario contar con materiales de referencia similares al material al que se le desea analizar. La Tesis de Hueda es el único antecedente de análisis de materiales (estuco) por PIXE, por lo que es necesario realizar una caracterización previa más robusta para el análisis de materiales por este tipo de técnicas de rayos X para poder establecer una metodología, a partir de la composición elemental, y seleccionar muestras potencialmente más apropiadas para mediciones arqueomagnéticas.

VI.3 Determinación de la Datación Arqueomagnética

Se empleó el programa REN-DATE que utiliza estadística bayesiana para obtener las intersecciones con la Curva de Variación secular para el centro de México (Modificado de Soler et al., 2006).

Tabla VI.27 Muestra la gráfica de la combinación de la intersección del valor medio de la inclinación y la declinación con la curva maestra de Variación Secular de la muestra TC2.

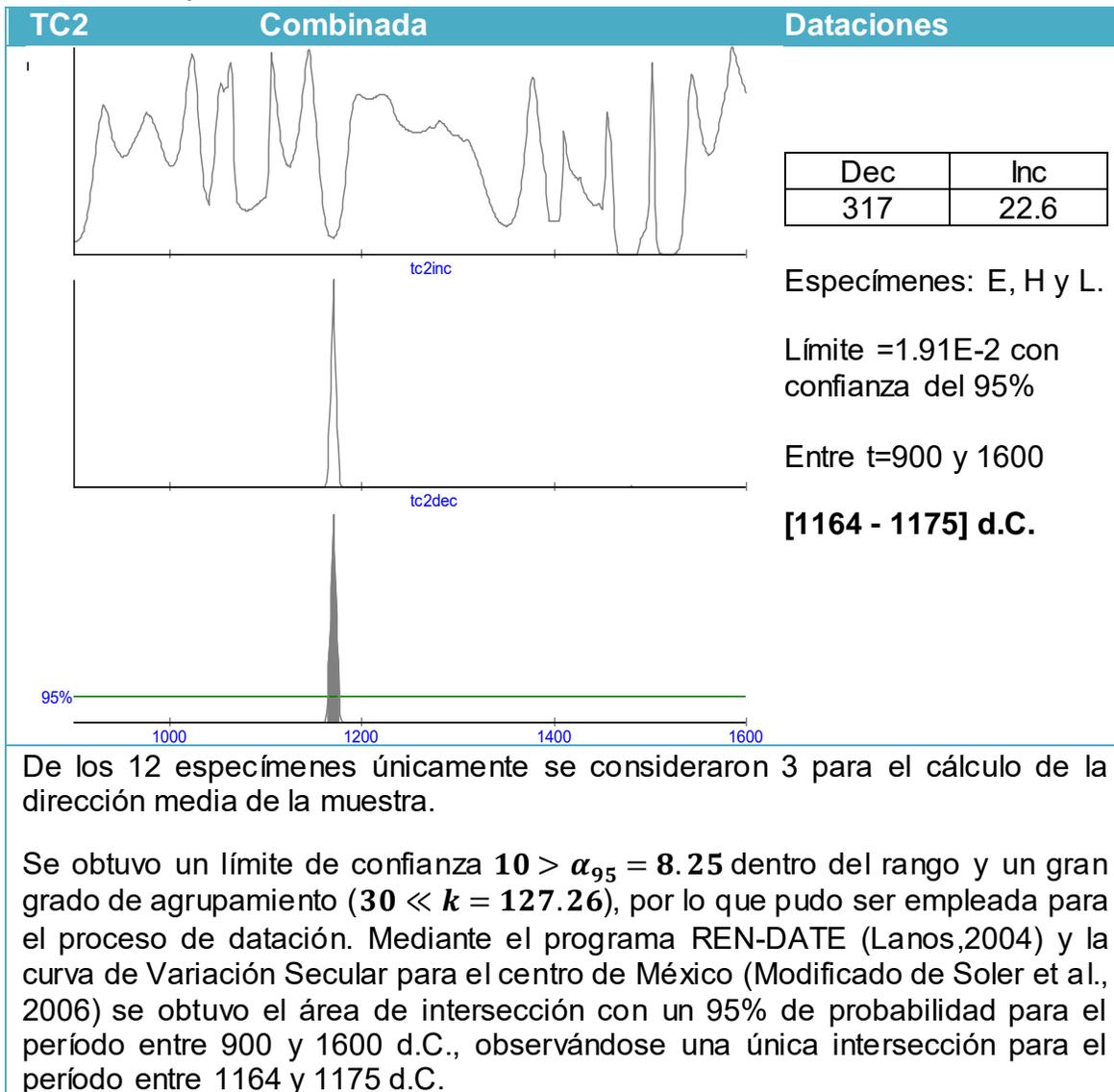


Tabla VI.28 Muestra la gráfica de la combinación de la intersección del valor medio de la inclinación y la declinación con la curva maestra de Variación Secular de la muestra TC5.

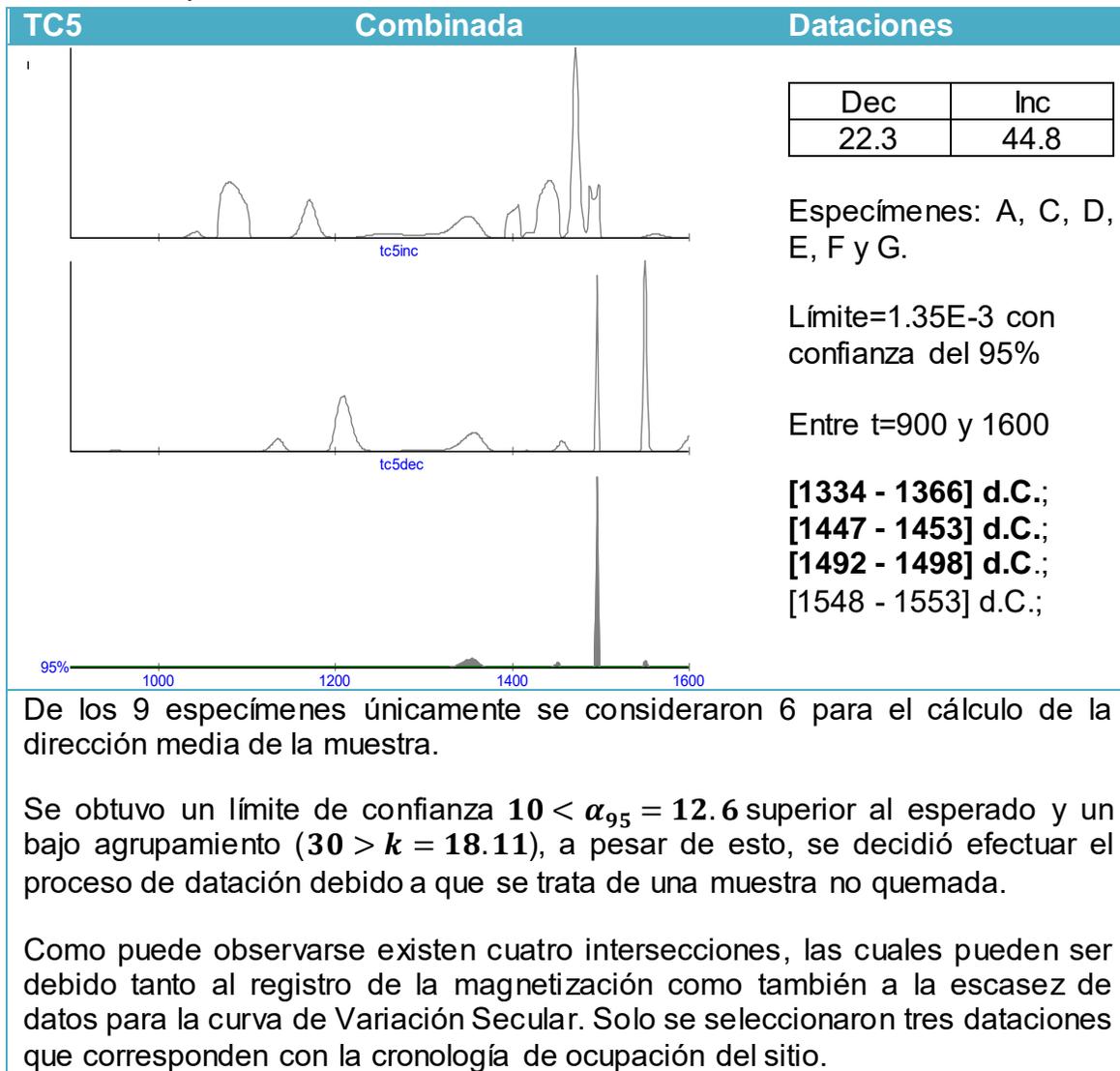
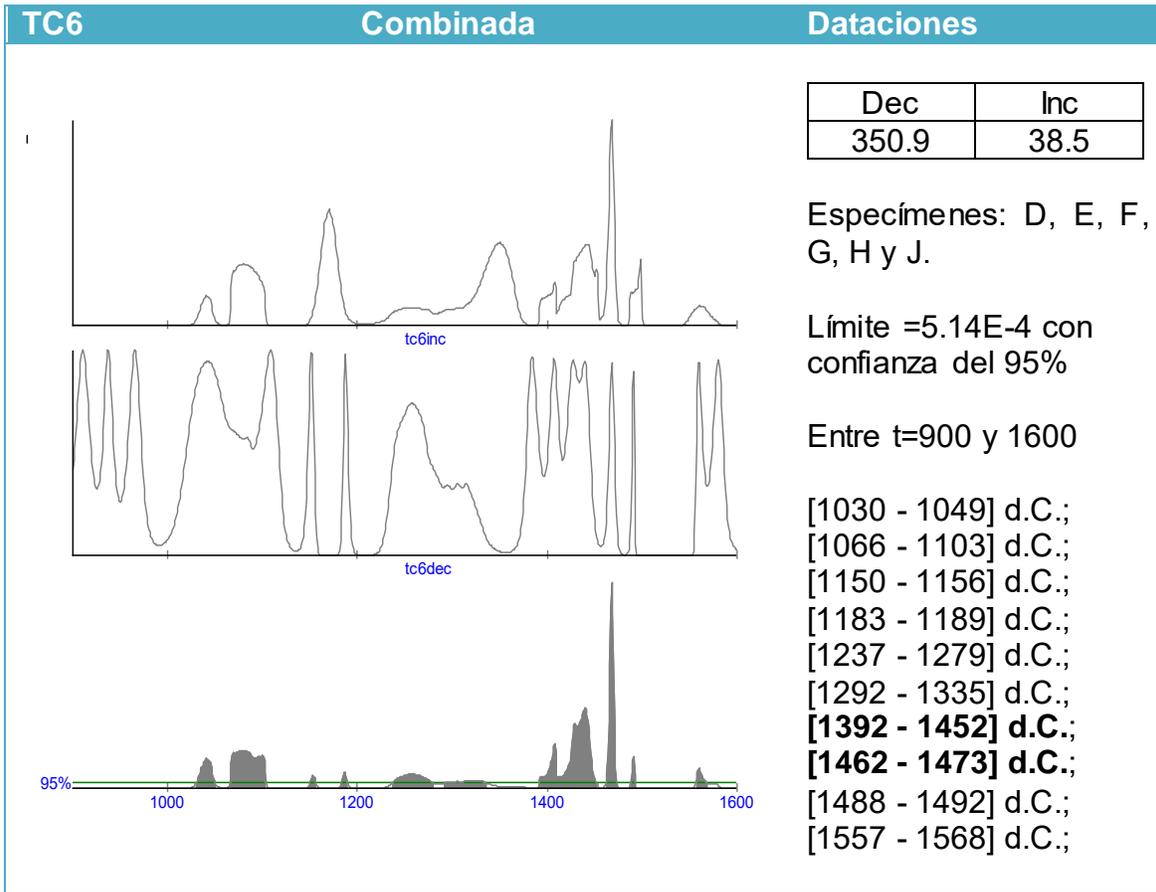


Tabla VI.29 Muestra la gráfica de la combinación de la intersección del valor medio de la inclinación y la declinación con la curva maestra de Variación Secular de la muestra TC6.

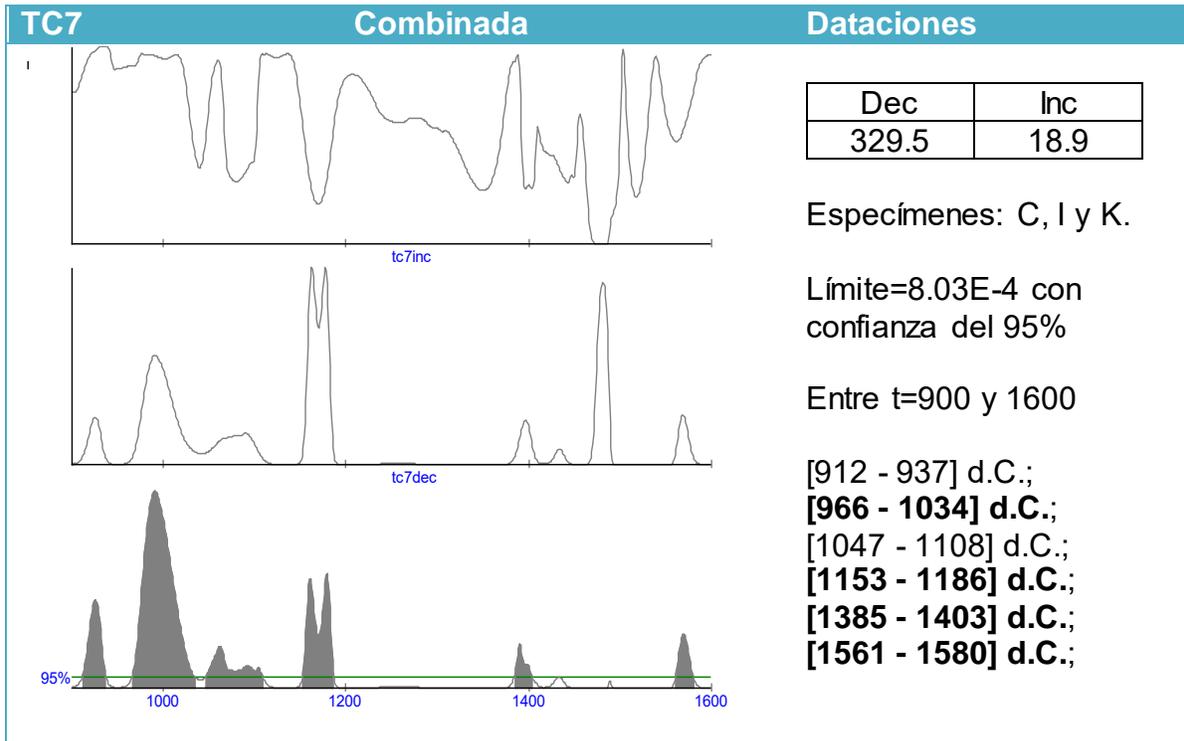


De los 12 especímenes únicamente se consideraron 6 para el cálculo de la dirección media de la muestra.

Se obtuvo un límite de confianza $10 > \alpha_{95} = 9.20$ dentro del rango y un grado de agrupamiento aceptable ($30 < k = 33.14$), por lo que pudo ser empleada para el proceso de datación.

Para esta muestra existen muchos periodos de intersección, lo cual puede ser consecuencia a la falta de datos de la curva para el período posclásico, más que a falta de definición en la dirección característica. Los dos periodos resaltados en letras negras fueron los elegidos por los arqueólogos como los más probables por la posición estratigráfica de la muestra.

Tabla VI.30 Muestra la gráfica de la combinación de la intersección del valor medio de la inclinación y la declinación con la curva maestra de Variación Secular de la muestra TC7.

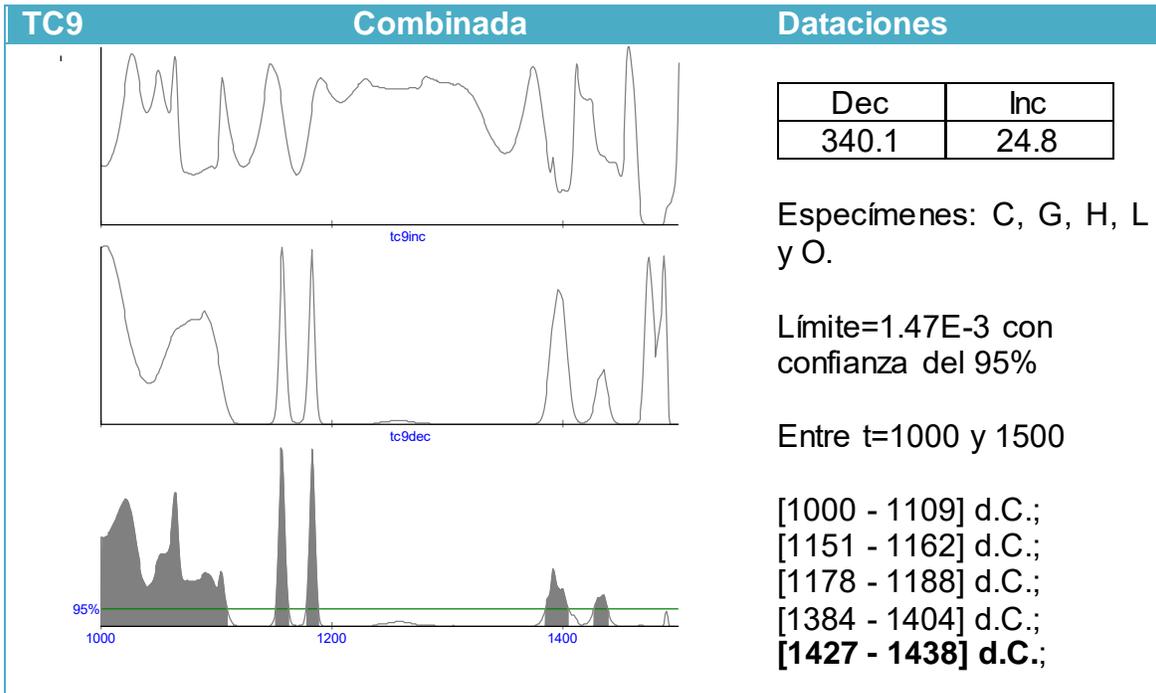


De los 12 especímenes únicamente se consideraron 3 para el cálculo de la dirección media de la muestra.

Se obtuvo un límite de confianza $10 < \alpha_{95} = 18.5$ superior al esperado y un grado de agrupamiento aceptable ($30 > k = 26.03$), a pesar de estos resultados se decidió efectuar el proceso de datación, debido a que se trata de una muestra no quemada.

Pueden observarse seis intersecciones, lo cual puede ser por el registro de la magnetización en la muestra así como también a la escasez de datos en la curva de Variación Secular para este período. Con la ayuda del arqueólogo del sitio, se seleccionaron cuatro dataciones correspondientes con la cronología de ocupación.

Tabla VI.31 Muestra la gráfica de la combinación de la intersección del valor medio de la inclinación y la declinación con la curva maestra de Variación Secular de la muestra TC9.

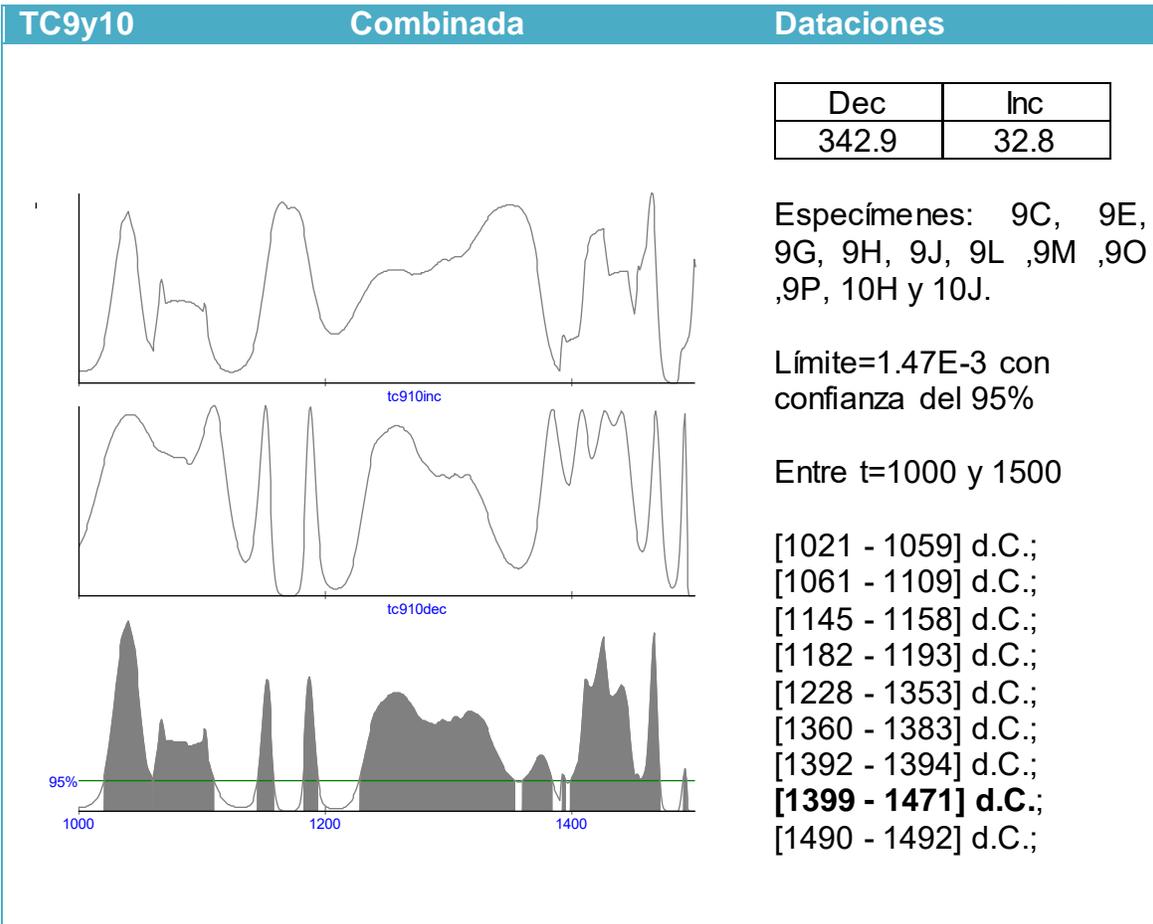


De los 16 especímenes únicamente se consideraron 5 para el cálculo de la dirección media de la muestra.

Se obtuvo un límite de confianza $10 < \alpha_{95} = 14.4$ superior al esperado y un grado de agrupamiento aceptable ($30 > k = 26.03$), a pesar de estos resultados se decidió efectuar el proceso de datación, debido a que se trata de una muestra no quemada.

Se observan varias intersecciones, lo que consideramos puede ser debido tanto al registro de la magnetización como también a la escasez de datos para la curva de Variación Secular. La datación seleccionada corresponde con la cronología de ocupación del sitio corroborada por el arqueólogo.

Tabla VI.32 Muestra la gráfica de la combinación de la intersección del valor medio de la inclinación y la declinación con la curva maestra de Variación Secular de la muestra TC9 y TC10.

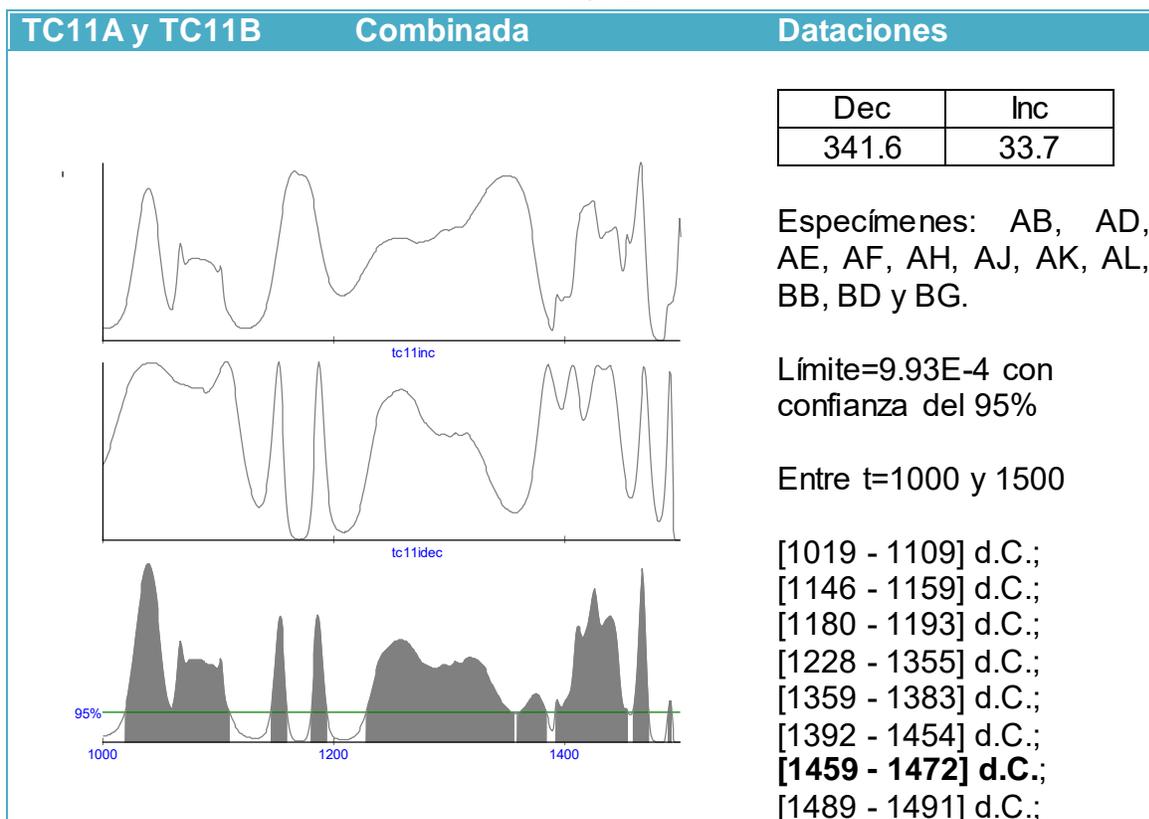


De los 28 especímenes únicamente se consideraron 11 para el cálculo de la dirección media de la muestra.

Se obtuvo un límite de confianza $10 < \alpha_{95} = 14.8$ superior al esperado y un grado de agrupamiento bajo ($30 > k = 10.49$), a pesar de estos resultados se decidió efectuar el proceso de datación debido a que se trata de una muestra no quemada. Como se menciona en la sección anterior, debe notarse que a la muestra TC10 no se le logró realizar la estadística de Fisher de forma independiente debido a que la dispersión es alta, sin embargo, al unirla con la muestra TC9 y tratarlas como un solo conjunto, la dispersión disminuyó. Esto fue válido ya que ambas corresponden a la misma etapa, según la tabla cronoestratigráfica brindada por el arqueólogo.

Pueden observarse muchas intersecciones durante el período seleccionado, esto puede ser causado por el registro de la magnetización y por la escasez de datos para la curva de Variación Secular. El especialista del sitio, en este caso, el arqueólogo encargado de la excavación eligió la datación más probable en base al contexto histórico.

Tabla VI.33 Muestra la gráfica de la combinación de la intersección del valor medio de la inclinación y la declinación con la curva maestra de Variación Secular de la muestra TC11A y TC11B.



De los 21 especímenes únicamente se consideraron 11 para el cálculo de la dirección media de la muestra.

Se obtuvo un límite de confianza $10 < \alpha_{95} = 20.7$ superior al esperado y un bajo grado de agrupamiento ($30 > k = 5.83$), a pesar de estos resultados se decidió efectuar el proceso de datación debido a que se trata de una muestra no quemada. Como se menciona en la sección anterior, debe notarse que a las muestras TC11A y TC11B no se les logró realizar la estadística de Fisher de forma independiente debido a que la dispersión es alta y al tratarlas como un solo conjunto, la dispersión disminuyó. Esto fue válido ya que ambas corresponden a la misma etapa.

La gran cantidad de intersecciones puede ser debido a dos causas, al registro de la magnetización y a la escasez de datos para la curva de Variación Secular. El arqueólogo eligió una de estas intersecciones ya que corresponde con la cronología de ocupación del sitio.

Las dataciones resaltadas en negro son las más probables ya que las referencias históricas consultadas afirman que durante estos periodos se realizó la ocupación en Dndachjian Tehuacán.

Las dataciones más probables se muestran en la siguiente tabla.

Tabla VI.34 Resultados del estudio de datación arqueomagnética realizado en Ndachjian Tehuacán en el estado de Puebla.

| Muestra | N | Dec | Inc | α_{95} | k | R | Dataciones más probables |
|---------------|----|-------|------|---------------|--------|-------|---|
| TC2 | 3 | 317 | 22.6 | 8.25 | 127.26 | 2.98 | [1164 - 1175] d.C. |
| TC5 | 6 | 22.3 | 44.8 | 12.6 | 18.11 | 5.72 | [1334 - 1366] d.C.; [1447 - 1453] d.C.; [1492 - 1498] d.C.; |
| TC6 | 6 | 350.9 | 38.5 | 9.20 | 33.14 | 5.85 | [1392 - 1452] d.C.; [1462 - 1473] d.C.; |
| TC7 | 3 | 329.5 | 18.9 | 18.5 | 26.3 | 2.92 | [966 - 1034] d.C.; [1153 - 1186] d.C.; [1385 - 1403] d.C.; [1561 - 1580] d.C.; |
| TC9 | 5 | 340.1 | 24.8 | 14.4 | 29.37 | 4.86 | [1000 - 1109] d.C.; [1151 - 1162] d.C.; [1178 - 1188] d.C.; [1384 - 1404] d.C.; [1427 - 1438] d.C.; |
| TC9y10 | 11 | 342.9 | 32.8 | 14.8 | 10.49 | 10.05 | [1021 - 1059] d.C.; [1061 - 1109] d.C.; [1145 - 1158] d.C.; [1182 - 1193] d.C.; [1228 - 1353] d.C.; [1360 - 1383] d.C.; [1392 - 1394] d.C.; [1399 - 1471] d.C.; [1490 - 1492] d.C.; |
| TC11 | 11 | 341.6 | 33.7 | 20.7 | 5.83 | 9.29 | [1019 - 1109] d.C.; [1146 - 1159] d.C.; [1180 - 1193] d.C.; [1228 - 1355] d.C.; [1359 - 1383] d.C.; [1392 - 1454] d.C.; [1459 - 1472] d.C.; [1489 - 1491] d.C.; |

A partir de la discusión con el Arqueólogo Omar García y la Maestra Nohemi Castillo, encargados del Proyecto Sur del Estado de Puebla Área Central Popoloca Tehuacán, se analizaron los contextos históricos y la estratigrafía de las muestras para así poder determinar las dataciones más probables contenidas en la Tabla VI.35.

Tabla VI.35 Resultados del estudio de datación arqueomagnética final realizado en Ndachjian Tehuacán en el estado de Puebla.

| Muestra | N | Dec | Inc | α_{95} | k | R | Dataciones más probables |
|-------------------|----|-------|------|---------------|--------|-------|--------------------------|
| TC2 | 3 | 317 | 22.6 | 8.25 | 127.26 | 2.98 | - |
| TC5 | 6 | 22.3 | 44.8 | 12.6 | 18.11 | 5.72 | 1447 - 1453 d.C. |
| TC6 | 6 | 350.9 | 38.5 | 9.20 | 33.14 | 5.85 | 1392 - 1452 d.C. |
| TC7 | 3 | 329.5 | 18.9 | 18.5 | 26.3 | 2.92 | 1385 - 1403 d.C. |
| TC9 | 5 | 340.1 | 24.8 | 14.4 | 29.37 | 4.86 | 1427 - 1438 d.C. |
| TC9 y TC10 | 11 | 342.9 | 32.8 | 14.8 | 10.49 | 10.05 | 1399 - 1471 d.C. |
| TC11 | 11 | 341.6 | 33.7 | 20.7 | 5.83 | 9.29 | 1459 - 1472 d.C. |

Los resultados obtenidos durante este trabajo de investigación se engloban de manera general en la siguiente tabla, cuyo fin es intentar dar posibles causas del porque fue no posible realizar la datación de algunas de las muestras.

Tabla VI.36 Muestra los resultados obtenidos de las diferentes técnicas utilizadas.

| Muestra | Parámetros Magnético | Datación (d.C.) | Anisotropía | Dominio Magnético (Diagrama de Day) | Fluorescencia de Rayos X | Ubicación y etapa | | | | | | | | | | |
|------------|--|---|---|-------------------------------------|--|---|---|---------------|------|--------|------|---|---|-------------------------|--|---|
| TC1 | - | Gran dispersión con polaridades normales y reversas, por lo que no puede obtenerse una dirección característica de magnetización. | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | En general, muestra una alta concentración de Calcio y una baja concentración de Hierro y Titanio. | Pilar 7 de la Sala con Pilares (etapa IV A) | | | | | | | | | | |
| TC2 | <table border="1"> <tr> <td>Dec</td> <td>Inc</td> </tr> <tr> <td>317</td> <td>22.6</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>k</td> <td>α_{95}</td> </tr> <tr> <td>2.98</td> <td>127.26</td> <td>8.25</td> </tr> </table> | Dec | Inc | 317 | 22.6 | R | k | α_{95} | 2.98 | 127.26 | 8.25 | La única datación obtenida no corresponde a la etapa supuesta por el arqueólogo. [1164 - 1175] d.C. | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | Muestra una alta concentración de Calcio y una baja concentración de Titanio, con zonas puntuales ricas en Silicio y Hierro. | Pilar 7 de la Sala con Pilares (etapa IV B) |
| Dec | Inc | | | | | | | | | | | | | | | |
| 317 | 22.6 | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | k | α_{95} | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.98 | 127.26 | 8.25 | | | | | | | | | | | | | | |
| TC3 | - | Gran dispersión con polaridades normales y reversas, por lo que no puede obtenerse una dirección característica de | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | En general, muestra una alta concentración de Calcio y una baja concentración de Hierro y Titanio. | Piso Inferior de la Sala con Columnas del Conjunto Central (etapa IV A) | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|---------------|--|--|-------------------------|--|---|---|---|---------------|------|-------|------|----------------|--|---|-------------------------|--|---|
| | | | magnetización. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TC4 | - | | Gran dispersión y polaridades reversas, por lo que no puede obtenerse una dirección característica de magnetización. | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical | Pseudo dominio sencillo | En general, muestra una alta concentración de Calcio y una baja concentración de Hierro y Titanio. | Piso Superior de la Sala con columnas del Conjunto Central (etapa IV B) | | | | | | | | | | | | |
| TC5 | <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Dec</td> <td>Inc</td> </tr> <tr> <td colspan="2">22.3</td> <td>44.8</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>K</td> <td>α_{95}</td> </tr> <tr> <td>5.72</td> <td>18.11</td> <td>12.6</td> </tr> </table> | Dec | | Inc | 22.3 | | 44.8 | R | K | α_{95} | 5.72 | 18.11 | 12.6 | 1447-1453 d.C. | | Se observa fábrica sedimentaria de un muro. K2 y k3 en el plano de depósito y K1 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | Muestra una alta concentración de Calcio y una baja concentración de Titanio, con zonas puntuales ricas en Silicio, Potasio y Hierro. | Muro del Templo Mayor (etapa IV B) |
| Dec | | Inc | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22.3 | | 44.8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | K | α_{95} | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.72 | 18.11 | 12.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TC6 | <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Dec</td> <td>Inc</td> </tr> <tr> <td colspan="2">350.9</td> <td>38.5</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>k</td> <td>α_{95}</td> </tr> <tr> <td>5.85</td> <td>33.14</td> <td>9.20</td> </tr> </table> | Dec | | Inc | 350.9 | | 38.5 | R | k | α_{95} | 5.85 | 33.14 | 9.20 | 1392-1452 d.C. | | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | Muestra una alta concentración de Calcio y una baja concentración de Titanio, con zonas puntuales ricas en Silicio, Potasio y Hierro. | Arriba del Templo Mayor (etapa III) |
| Dec | | Inc | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 350.9 | | 38.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | k | α_{95} | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.85 | 33.14 | 9.20 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TC7 | <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Dec</td> <td>Inc</td> </tr> <tr> <td colspan="2">329.5</td> <td>18.9</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>k</td> <td>α_{95}</td> </tr> <tr> <td>2.92</td> <td>26.03</td> <td>18.5</td> </tr> </table> | Dec | | Inc | 329.5 | | 18.9 | R | k | α_{95} | 2.92 | 26.03 | 18.5 | 1385-1403 d.C. | | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | Muestra una alta concentración de Calcio y Silicio y una baja concentración de Titanio, con zonas puntuales ricas en Potasio y Hierro. | Plaza A en la parte superior (etapa IV A) |
| Dec | | Inc | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 329.5 | | 18.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | k | α_{95} | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.92 | 26.03 | 18.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Gran dispersión con polaridades normales y | Se observa fábrica sedimentaria de un muro. | | En general, muestra una alta | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--|---|--|-------------------------|--|--------------------------------|------|---|---|---------------|-------|-------|------|----------------|--|-------------------------|--|--|
| TC8 | - | reversas, por lo que no puede obtenerse una dirección característica de magnetización. | K2 y k3 en el plano de depósito y K1 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | concentración de Calcio y una baja concentración de Hierro y Titanio. | Muro de la Plaza A (etapa III) | | | | | | | | | | | | |
| TC9 | <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Dec</td> <td>Inc</td> </tr> <tr> <td colspan="2">340.1</td> <td>24.8</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>k</td> <td>α_{95}</td> </tr> <tr> <td>4.86</td> <td>29.37</td> <td>14.4</td> </tr> </table> | Dec | | Inc | 340.1 | | 24.8 | R | k | α_{95} | 4.86 | 29.37 | 14.4 | 1427-1438 d.C. | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | Muestra una alta concentración de Calcio y Silicio y una baja concentración de Titanio, con zonas puntuales ricas en Potasio y Hierro. | Pilar 10 de la Sala con Pilares (etapa IV B) |
| Dec | | Inc | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 340.1 | | 24.8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | k | α_{95} | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.86 | 29.37 | 14.4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TC10 | - | Gran dispersión con polaridades normales y reversas, por lo que no puede obtenerse una dirección característica de magnetización. | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | En general, muestra una alta concentración de Calcio y una baja concentración de Hierro y Titanio. | Sala con Columnas (etapa IV B) | | | | | | | | | | | | |
| TC9 y TC10 | <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Dec</td> <td>Inc</td> </tr> <tr> <td colspan="2">342.9</td> <td>32.8</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>k</td> <td>α_{95}</td> </tr> <tr> <td>10.05</td> <td>10.49</td> <td>14.8</td> </tr> </table> | Dec | | Inc | 342.9 | | 32.8 | R | k | α_{95} | 10.05 | 10.49 | 14.8 | 1399-1471 d.C. | - | - | - | Etapa IV B |
| Dec | | Inc | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 342.9 | | 32.8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | k | α_{95} | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.05 | 10.49 | 14.8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TC11A | - | Gran dispersión con polaridades normales, por lo que no puede obtenerse una dirección | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje | Pseudo dominio sencillo | En general, muestra una alta concentración de Calcio y una baja concentración de Hierro y Titanio. | Muro norte (etapa IV A) | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--|---|--|-------------------------|--|-------------------------|---|---------------|------|------|------|----------------|---|---|---|------------|
| | | característica de magnetización. | vertical. | | | | | | | | | | | | | |
| TC11B | - | Gran dispersión con polaridades normales, por lo que no puede obtenerse una dirección característica de magnetización. | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | Muestra una alta concentración de Calcio y Silicio y una baja concentración de Titanio, con zonas puntuales ricas en Potasio y Hierro. | Muro norte (etapa IV A) | | | | | | | | | | |
| TC11 | <table border="1"> <tr> <td>Dec</td> <td>Inc</td> </tr> <tr> <td>341.6</td> <td>33.7</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>k</td> <td>α_{95}</td> </tr> <tr> <td>9.29</td> <td>5.83</td> <td>20.7</td> </tr> </table> | Dec | Inc | 341.6 | 33.7 | R | k | α_{95} | 9.29 | 5.83 | 20.7 | 1459-1472 d.C. | - | - | - | Etapa IV A |
| Dec | Inc | | | | | | | | | | | | | | | |
| 341.6 | 33.7 | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | k | α_{95} | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.29 | 5.83 | 20.7 | | | | | | | | | | | | | | |
| TC12 | - | Gran dispersión con polaridades normales y reversas, por lo que no puede obtenerse una dirección característica de magnetización. | Se observa fábrica sedimentaria de un piso. k1 y k2 en el plano de depósito y K3 agrupada en eje vertical. | Pseudo dominio sencillo | En general, muestra una alta concentración de Calcio y una baja concentración de Hierro y Titanio | Muro norte (etapa IV B) | | | | | | | | | | |

VI.3.1 Comparación de la datación Arqueomagnética de Ndachjian Tehuacán con el Modelo de Variación Paleosecular ARCH3k

Como se mencionó en el capítulo IV, el modelo Arch3k (Donadini et al, 2009) contiene datos de flujos de lava y arqueológicos por lo que es el modelo global adecuado para comparar las dataciones obtenidas. Dicho modelo se encuentra en la página web <http://geomagia.ucsd.edu> de la Universidad de California en San Diego y solo se descargaron los datos correspondientes al período de asentamiento del pueblo Popoloca en esta región.

Debido a la falta de una cronología exacta del sitio arqueológico de Ndachjian Tehuacán se propuso un método estadístico para realizar una cronología en función de la siguiente tabla.

Tabla VI.37 Muestra la cronología relativa de las muestras extraídas del sitio Ndachjian Tehuacán.

| Muestra | Etapa |
|---------------|-------|
| TC1 | IV A |
| TC2 | IV B |
| TC3 | IV A |
| TC4 | IV B |
| TC5 | IV B |
| TC6 | III |
| TC7 | IV A |
| TC8 | III |
| TC9 | IV B |
| TC10 | IV B |
| TC11-A | IV A |
| TC11-B | IV A |
| TC12 | IV B |

Bajo la suposición de que cada muestra corresponde a determinada etapa, debería tener una dirección magnética media independientemente de la localización. Por lo que, las muestras a las que se le fue posible realizar la datación se dividieron en tres grupos según la etapa a la que corresponden y con el uso de la estadística de Fisher se obtuvo la dirección magnética media con sus correspondientes parámetros como se muestra en la Tabla VI.38.

Tabla VI.38 Muestra las direcciones medias de los modelos propuestos para la cronología del sitio.

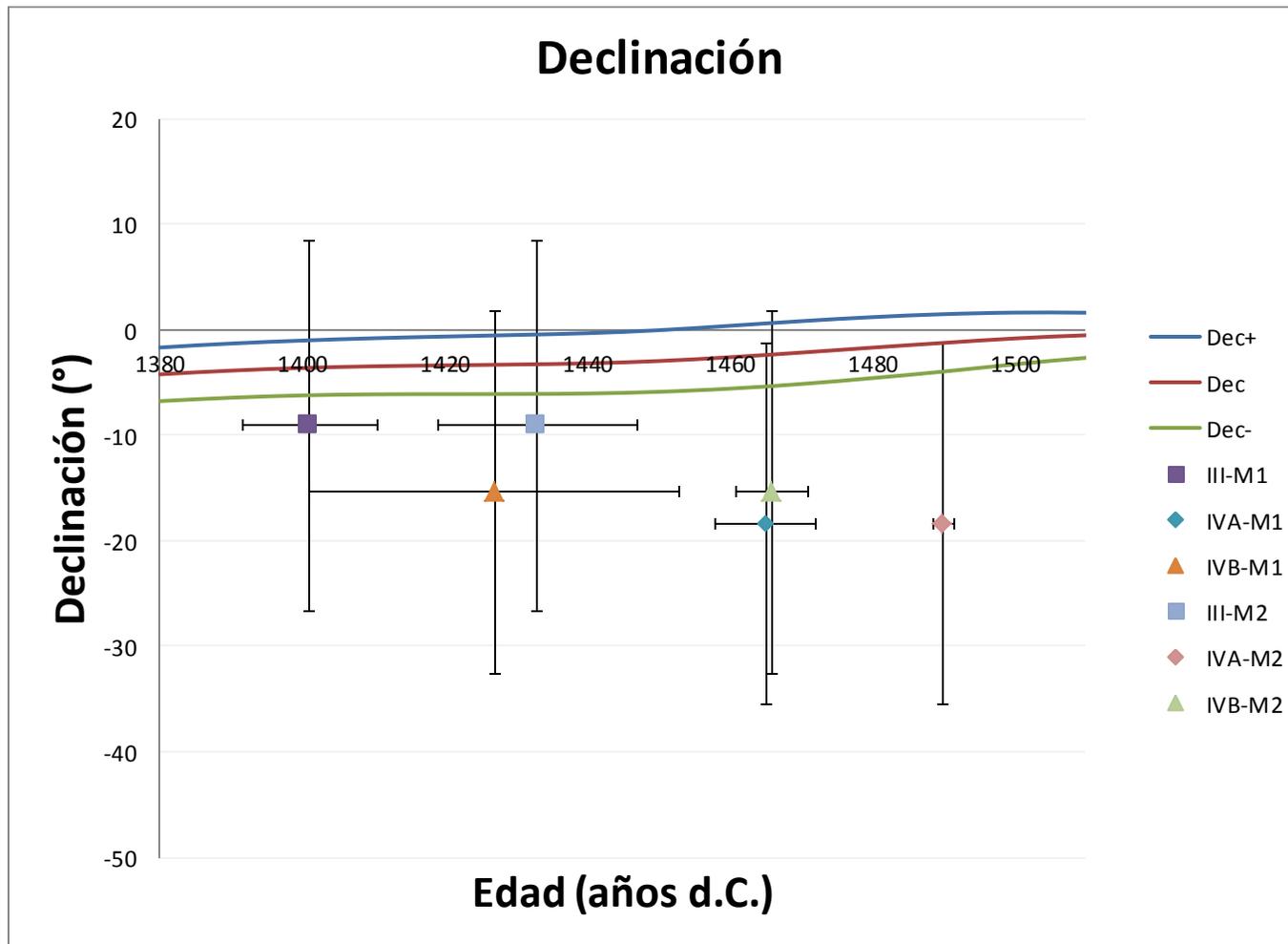
| Etapa | Declinación | Inclinación | α_{95} |
|------------|-------------|-------------|---------------|
| IVA | -18.4 | 33.7 | 20.7 |
| IVB | -15.4 | 35 | 8.8 |
| III | -9.1 | 38.5 | 9.2 |

Con los datos de la Tabla VI.38 se empleo el programa REN-DATE que utiliza estadística bayesiana para obtener las intersecciones con la Curva de Variación secular para Teotihuacán (Modificado de Soler et al., 2006), los resultados muestran dos posibles modelos cronoestratigráficos que se muestran en la Tabla VI.39.

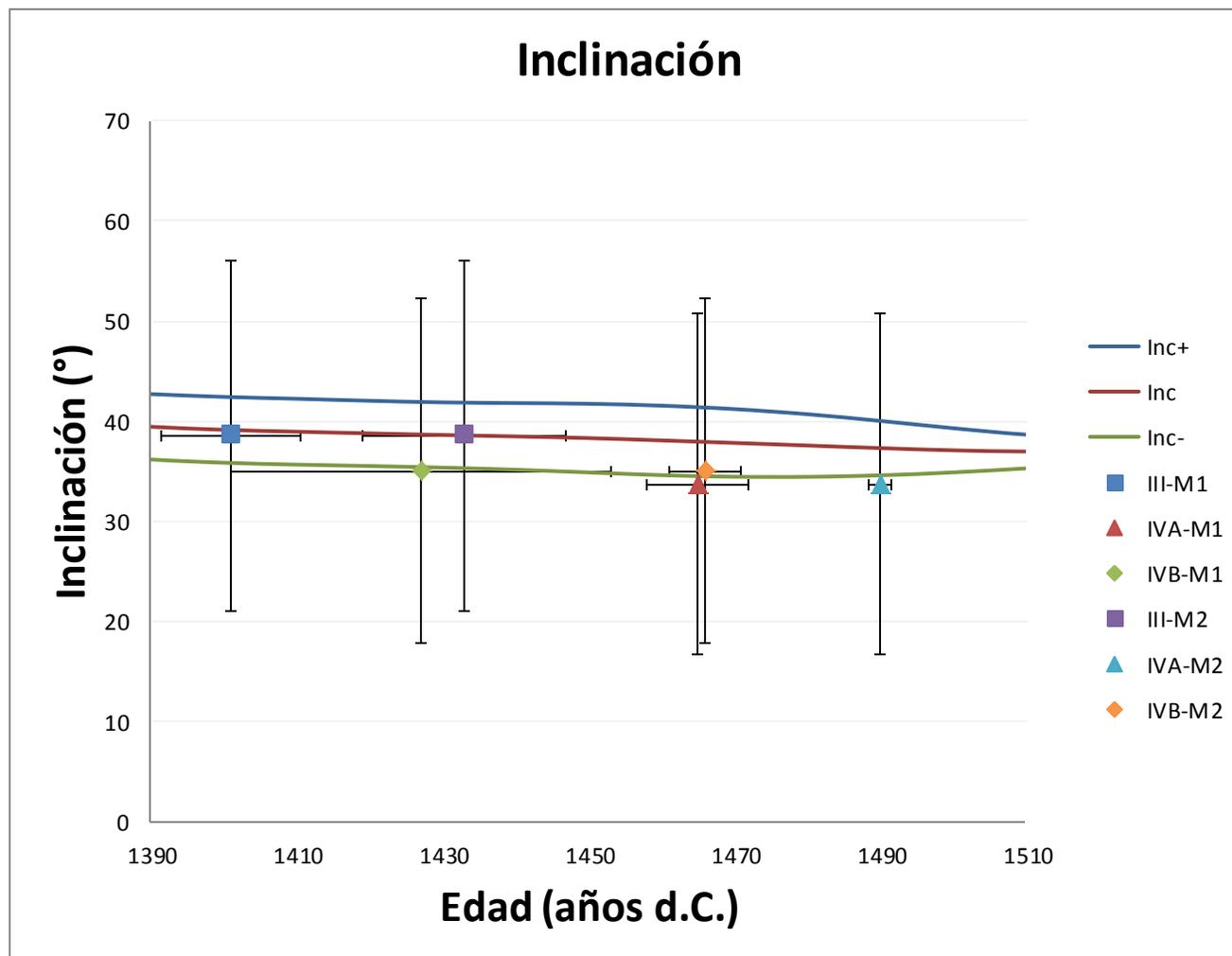
Tabla VI.39 Muestra las fechas probables de los modelos propuestos para la cronología del sitio.

| Etapa | Modelo 1: M1 | Modelo 2: M2 |
|------------|--------------|--------------|
| IVA | 1459-1472 | 1489-1491 |
| IVB | 1401-1453 | 1461-1471 |
| III | 1392-1411 | 1419-1447 |

Ambos resultados son comparados con el modelo Arch3k (Donadini et al., 2009) para la zona de estudio como se muestra en las gráficas VI.29 y VI.30.



Gráfica VI.29 Muestra la comparación en la Declinación entre el modelo M1 y el modelo M2 con el modelo Arch3k (Donadini et al, 2009). Donde III-M1 es la etapa III del modelo M1, IVA-M1 es la etapa IVA del modelo M1, IVB-M1 es la etapa IVB del modelo M1, III-M2 es la etapa III del modelo M2, IVA-M2 es la etapa IVA del modelo M2 y IVB-M2 es la etapa IVB del modelo M2.



Gráfica VI.30 Muestra la comparación en la Inclinación entre el modelo M1 y el modelo M2 con el modelo Arch3k (Donadini et al, 2009). Donde III-M1 es la etapa III del modelo M1, IVA-M1 es la etapa IVA del modelo M1, IVB-M1 es la etapa IVB del modelo M1, III-M2 es la etapa III del modelo M2, IVA-M2 es la etapa IVA del modelo M2 y IVB-M2 es la etapa IVB del modelo M2.

Conclusiones

- Se obtuvieron 7 dataciones en la tabla a continuación, las cuales fueron ampliamente discutidas con los arqueólogos del sitio para la elección de las más probables, donde además de la dirección arqueomagnética se tomo en cuenta la estratigrafía y evidencias arqueológicas. Estas dataciones son una importante aportación a la cronología del sitio dada la falta de otros materiales para poder datar.

| Muestra | N | Dec | Inc | α_{95} | k | R | Dataciones más probables |
|-------------------|----|-------|------|---------------|--------|-------|--------------------------|
| TC2 | 3 | 317 | 22.6 | 8.25 | 127.26 | 2.98 | - |
| TC5 | 6 | 22.3 | 44.8 | 12.6 | 18.11 | 5.72 | 1447 - 1453 d.C. |
| TC6 | 6 | 350.9 | 38.5 | 9.20 | 33.14 | 5.85 | 1392 - 1452 d.C. |
| TC7 | 3 | 329.5 | 18.9 | 18.5 | 26.3 | 2.92 | 1385 - 1403 d.C. |
| TC9 | 5 | 340.1 | 24.8 | 14.4 | 29.37 | 4.86 | 1427 - 1438 d.C. |
| TC9 y TC10 | 11 | 342.9 | 32.8 | 14.8 | 10.49 | 10.05 | 1399 - 1471 d.C. |
| TC11 | 11 | 341.6 | 33.7 | 20.7 | 5.83 | 9.29 | 1459 - 1472 d.C. |

- En general, observamos una gran dispersión en los resultados ($8 < \alpha_{95} < 21$), que pensamos es debido a la carencia de minerales magnéticos por lo que nos encontramos en los límites de detección del magnetómetro. Este hecho, contrario a otros sitios estudiados cercanos a la Faja Volcánica Trans Mexicana (FVTM), donde la adición de productos volcánicos como cenizas y tezontles era común, realiza el registro magnético, denota que dada la zona con abundancia de calizas no hacía necesaria su incorporación en la mezcla. Lo anterior es confirmado por los resultados de XRF ya que la concentración de Calcio está delimitada entre el 25 wt% y el 50 wt% en comparación del material magnético (Fe y Ti) que tiene una concentración menor al 0.1 wt% (Tabla VI.26 del Capítulo VI).
- El método de Fluorescencia de Rayos X ayudó al determinar las concentraciones elementales de cada una de las muestras, principalmente

el hierro, como un indicativo de su importancia en la datación por el método Arqueomagnético. En este trabajo se realizó una comparación de la concentración elemental entre las muestras obtenidas en el sitio y así determinar si a partir de esta la diferencia hay una correlación con las muestras a las que si se les logro realizar la datación, dando como resultado que las muestras a las que se les logró realizar una datación fue probablemente a que en zonas puntuales mostraban un aumento pequeño en la concentración de Hierro (Gráficas VI.1 a VI.26 del Capítulo VI) respecto a los demás elementos.

- Los estucos no quemados estudiados no presentan un buen registro del Campo Geomagnético ya que solo el 62% lograron datarse, esto está apoyado en la caracterización de materiales por Fluorescencia de Rayos X (XRF), donde se demuestra una abundancia de Calizas (Calcio) y una escasez de material magnético (Fe y Ti). A pesar de las características presentes en las muestras, las dataciones obtenidas son una importante aportación para la cronología del sitio dada la falta de otros materiales susceptibles de ser empleados para realizar una datación.
- Los estudios de magnetismo de rocas como la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS) nos permite apuntar que las fábricas magnéticas son primarias de tipo sedimentario y corresponden con la muestra estudiada para *i)* pisos con k3 perpendiculares a la superficie de depósito y, k1 y k2 sobre la misma la superficie de depósito; y *ii)* muros con k1 perpendiculares a la superficie de depósito y, k2 y k3 sobre la misma la superficie de depósito como se muestra en la Tabla VI.24 del Capítulo VI.
- Los Ciclos de Histéresis y de Magnetización Remanente Isotérmica (IRM) apunta a que en las muestras con buen registro (TC1, TC2, TC5, TC6, TC7, TC10, TC11A y TC11B) del Campo Geomagnético corresponden a Dominios Sencillos y a Pseudo Dominios Sencillos con Titanomagnetitas

pobres en Titanio (Figura VI.1 del Capítulo VI), esto también es observado en los espectros de desmagnetización de los especímenes (Anexo A). Por el contrario, las muestras TC3, TC4, TC8, TC9 y TC12 presentan Dominios Múltiples con mayores tamaños de grano magnético y por tanto, no pudo lograrse un buen registro de la magnetización de tipo detrítica.

- Mediante Arqueomagnetismo se proponen dos modelos para la cronología del sitio (Tabla VI.39 del Capítulo VI). Ambos modelos fueron comparados con el modelo global Arch3k (Gráficas VI.29 y VI.30 del Capítulo VI). Vemos que ambos modelos propuestos son muy similares al modelo global, lo anterior lleva a la necesidad de emplear otro método radiométrico que ayude a elegir el más probable.
- También se propone la realización de más muestreos para enriquecer la cronología del sitio, así como la realización de las dataciones de las etapas faltantes. De igual manera buscar estucos quemados para mejorar la determinación de direcciones y minimizar el efecto del alto contenido de Silicio.
- El objetivo principal se cumple debido a que la cronología propuesta se basa únicamente en el método Arqueomagnético y en el control estratigráfico propuesto por el arqueólogo (dentro del periodo de asentamiento del sitio), por lo que los datos aportados son válidos para la cronología de Ndachjian Puebla.

Referencias Bibliográficas

- AGICO, 2004. JR6/JR6A User's Manual. *Instrument for measuring remanent magnetization*. Brno, Czech Republic.
- Aitken, M. J., 1990. *Science-based Dating in Archaeology*. Longman Archaeology Series. 225-259.
- Bathal, R. S., 1971. *Magnetic anisotropy in Rocks*. Earth Sci. Rev. 7, 227-253.
- Butler, R., 1992. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terraines*. Blackwell Scientific Publications. Arizona.
- Caballero Miranda, C. 2011. *La fábrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS)*. Monografía del Instituto de Geofísica No. 16. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castillo, Noemi. 2002. *Cartografía de sitios mencionados en fuentes históricas del área del Valle de Tehuacán, Puebla*. Revista de la coordinación Nacional de Arqueología. Núm. 27, 2002.
- David J. Griffiths. 1999. *Introduction to Electrodynamics*. Hall. Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- Dunlop, D. J. y S. XU, 1993. *A comparison of methods of granulometry and domain structure determination*. Eos (Trans. Am. Geophys. Un.).
- Dunlop, D. J., 1995. *Magnetism in rocks*. J. Geophys. Res., 100, 2161-2174.
- Eduardo Chaparro, M. A. 2006. *Estudio de Parámetros Magnéticos de Distintos Ambientes Relativamente Contaminados en Argentina y Antártida*. Monografías del Instituto de Geofísica No. 7. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Fisher, R. A., 1953. *Dispersion on a sphere*. Proceedings of the Royal Society, A. 217, London, 295-305.
- Gámez, Alejandra. 2006. *Popolocas, pueblos indígenas del México Contemporáneo*. Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. México, D.F.
- Girdler, R. W., 1961. *The measurements and computation of anisotropy of magnetic susceptibility in rocks*. Geophys. Jour. Roy. Astron. Soc. Amer., 65, 1257-1258.
- Griffith, W. 2008. *Física conceptual*. McGraw-Hill.
- Hall, E. T., *X-ray fluorescence analysis applied to Archaeology*, Archaeometry, vol. 3, 1960.
- Heslop, D., M. J. Dekkers, P. P. Kruiver y I. H. M. Van Ooschot, 2002. *Analysis of isothermal remanent magnetisation acquisition curves using expectation-maximisation algorithm*. Geophys. J. Int.
- Hrouda, F., 1982. *Magnetic Anisotropy of Rocks and its Applications in Geology and Geophysics*. Geophys Surveys, 5, 37-82.
- Hueda Y., 2000. *Fechaamientos arqueomagnéticos de estuco de los sitios de Teopancho, Teotihuacán y Templo Mayor, Tenochtitlan*. Tesis de Licenciatura en Arqueología, ENAH, México, 128 pp.
- *Informe al consejo del arqueología temporada de campo 2006* del Proyecto Sur del Estado de Puebla Área Central Popoloca Tehuacan. DEA-INAH. 2007.
- *Informe al consejo del arqueología temporada de campo 2008* del Proyecto Sur del Estado de Puebla Área Central Popoloca Tehuacan. DEA-INAH. 2009.
- Jacobs, J. A. 2005. *Reversals of the Earth's Magnetic Field*. Cambridge University Press. 360 pp.
- Jäecklein, Kaus J. 1979. *Apuntes sobre la historia prehispánica de los popolocas de Puebla*, en Barbro Dalhgren (coord.), Mesoamérica. Homenaje al Doctor Paul Kirchhoff, México, SEP-INAH.

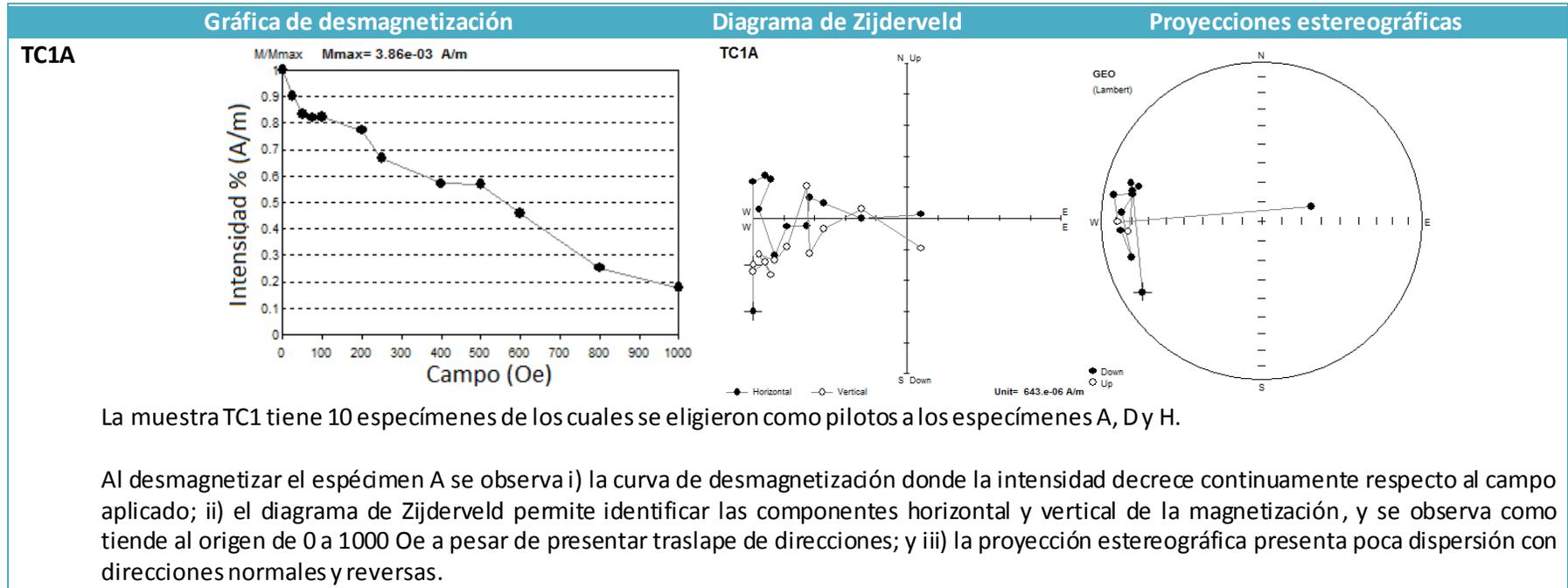
- L.D. Landau & E.M. 1960. Lifshitz *Electrodynamics of Continuous Media* (Volume 8 of A Course of Theoretical Physics). Pergamon Press.
- Lanos, P., 2004. *Bayesian inference of calibration curves: application to archaeomagnetism*. In *Tools for Constructing Chronologies Crossing Disciplinary Boundaries*, Buck, C.E. y Millard, A.R. Eds. Lecture Notes in Statistics, 177, Springer-Verlag, London, 43-82.
- López, Alfredo. López, Leonardo. *La periodización de la historia mesoamericana*. Revista de Arqueología. Vol. VIII. Núm. 43. (Mayo-Junio) 2000.
- López, Ramón. *Estructura 1 del Conjunto Central de Tehuacán. Su remodelación inconclusa*. Revista de la coordinación Nacional de Arqueología. Septiembre-Diciembre 2010.
- Lozano R. y Bernal J. P. *Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, núm. 3, 2005, p. 329-344.
- Merrill, R. T. y M. W. McElhinny, 1983. *The earth's magnetic field*. Academic Press, New York.
- Reitz, John R., Milford, Frederick J., y Christy, Robert W., 1996. *Fundamentos de teoría electromagnética*. Addison Wesley Iberoamericana. México. 641 pp.
- Rousseau, R.M., J.P. Willis & A.R. Duncan. 1996. *Practical XRF calibration procedures for major and trace elements*. *X-Ray Spectrom.*, 179-189 pp.
- Ruvalcaba, J. L. 2011. *Estudio No destructivo de Metales: Técnicas basada en Rayos X Característicos (XRF, EDX Y PIXE)*. *Notas Corrosivas*. Memorias del 3er Congreso Latinoamericano de Restauración de Metales. Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, Instituto Nacional de Antropología e Historia. México.

- Ruvalcaba J. L. 2008. *Las técnicas de origen nuclear: PIXE y RBS*. La Ciencia y el Arte. Instituto del Patrimonio Histórico Español. IPHE-CSIC, Madrid. p. 151-172.
- Ruvalcaba J.L., Rámirez D., Aguilar V., y Picazo F. *SANDRA: A Portable XRF System for the Study of Mexican Cultural Heritage*. *X-ray Spectrometry* 39 (2010) 338-345.
- Shackley, M., *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*, Springer, 2011.
- Soler-Arechalde. A. M., 2006. *Investigaciones arqueomagnéticas en México - Fundamentos, Historia y Futuro-*. Monografías del Instituto de Geofísica. No.10. Universidad Nacional Autónoma de México. 90 pp.
- Soler-Arechalde. A. M., 2014. *Arqueomagnetismo en México 1965-2013*. En *Latinmag Letters*, Volume 4 - Number 4. LL14-0402Rv, 1-14. ISSN:2007-9656.
- Tarling, D. y F. Hrouda, 1993. *The magnetic anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall. 217 pp.
- Tauxe, L., 2010. *Essentials of Paleomagnetism*. University of California Press.
- Tauxe, L., 1993. *Sedimentary records of relative paleointensity of geomagnetic field: Theory and practice*. *Rev. Geophys.*
- Thellier, E. y O. Thellier, 1959b. *The intensity of the geomagnetic field in the historical and geological past*. *Akad. Nauk. SSR. Izv. Geophys. Ser.*, 1296-1331.
- Thompson, R., J. Bloemendal, J. Dearing, F. Oldfield, J. Rummery, J. Stober y G. Turner, 1980. *Environment applications of magnetic measurements*. *Science*, 207, No. 4430, 481-486.
- Thompson, R. y F. Oldfield, 1986. *Environmental magnetism*. Allen & Unwin (Publishers) Ltd. 225 pp.

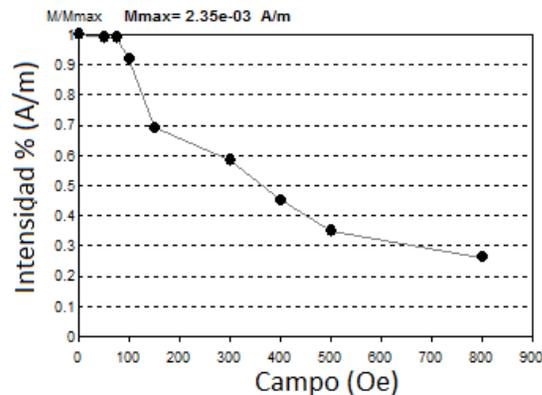
- Vekemans, B.K., L. Janssens, L. Vincze, F. Adams & P. Van Espen. 1994. *Analysis of X-ray spectra by iterative least squares (AXIL): new developments*. *X-Ray Spectrom.*, 278-285 pp.
- Wolfman, D., 1990. *Mesoamerican chronology and archaeomagnetic dating*, AD 1-1200. En: *Archaeomagnetic dating* Egmy, J. L. y R. S. Sternberg editors, University of Arizona Press, Tucson.

Anexo A. Gráfica de desmagnetización, Diagrama de Zijderveld y Proyecciones estereográficas.

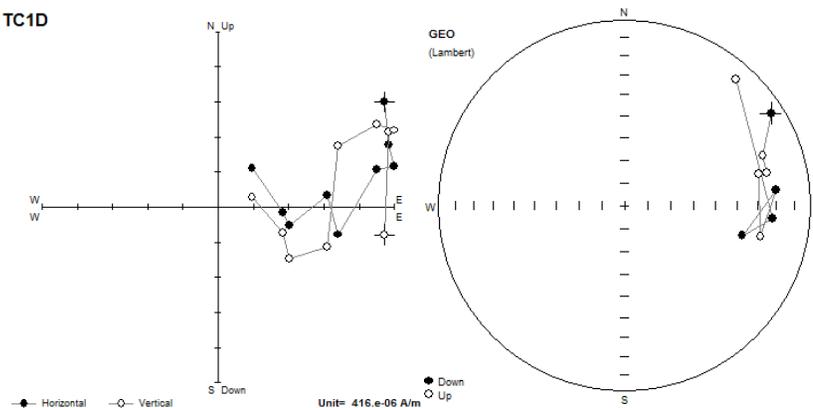
Tabla 1. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC1.



TC1D

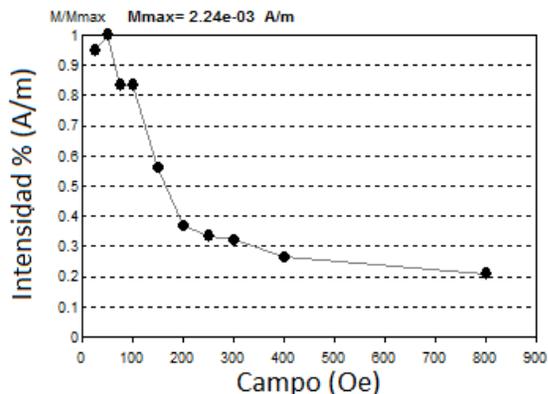


TC1D

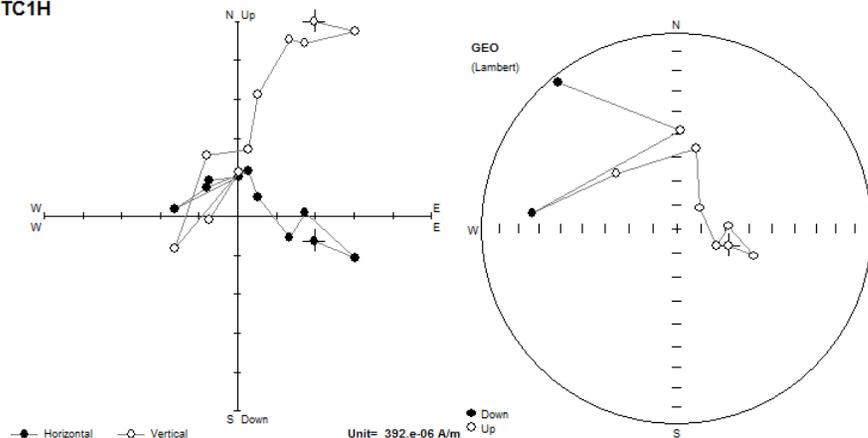


Al desmagnetizar el espécimen D se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 800 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales y reversas.

TC1H



TC1H



Al desmagnetizar el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 800 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

Tabla 2. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC2.

Gráfica de desmagnetización

TC2E

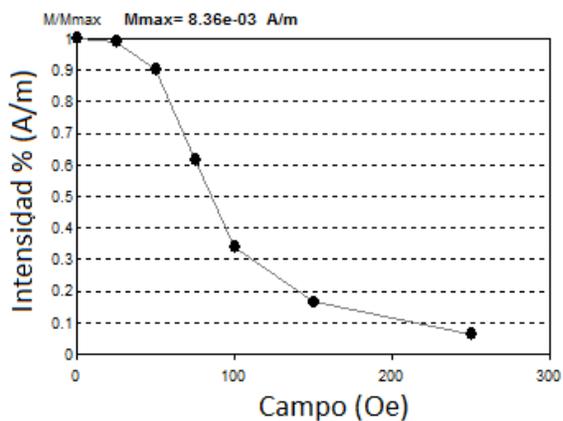
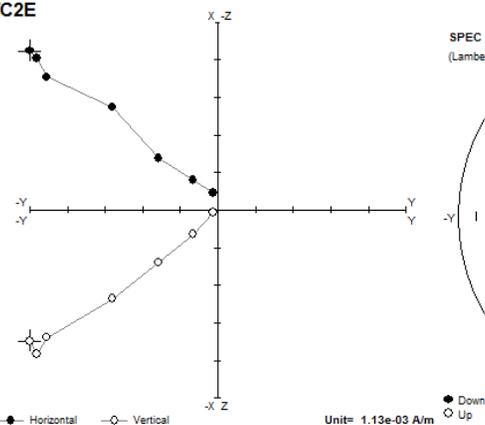
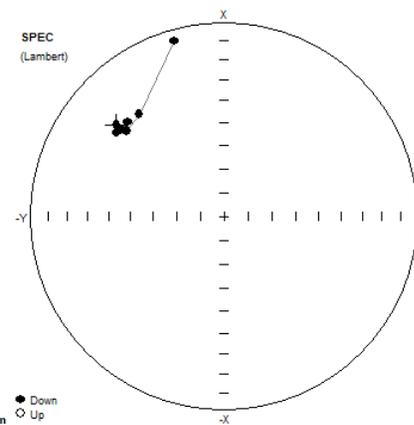


Diagrama de Zijderveld

TC2E

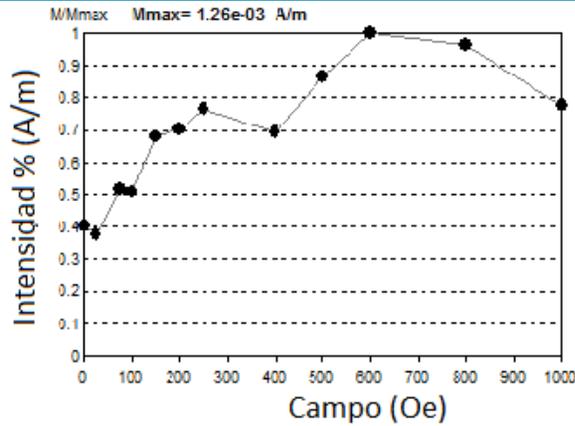
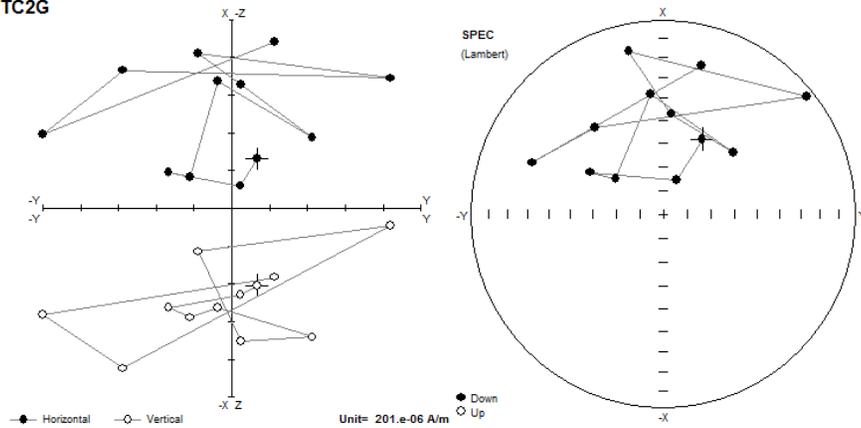


Proyecciones estereográficas

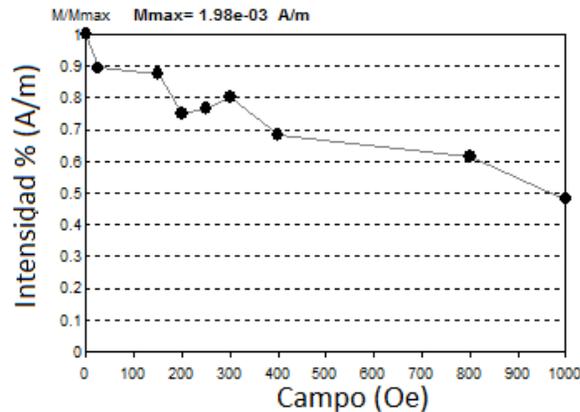
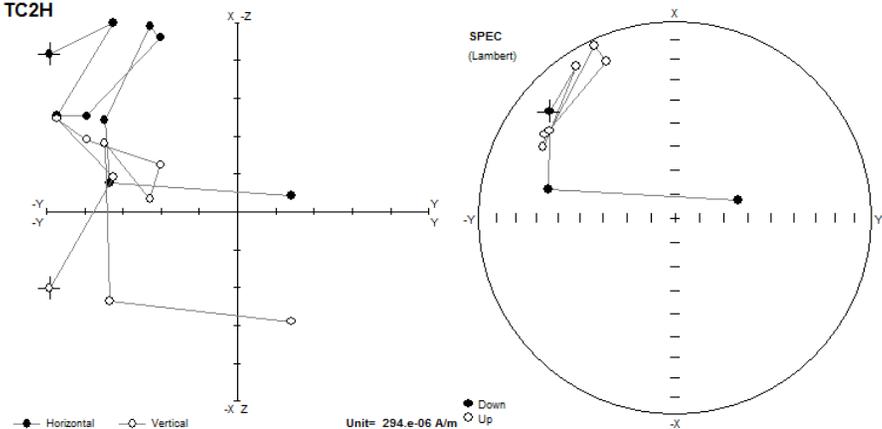


La muestra TC2 tiene 12 especímenes de los cuales se eligieron como pilotos a los especímenes E, G, H, I, J y L.

Al desmagnetizar el espécimen E se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales.

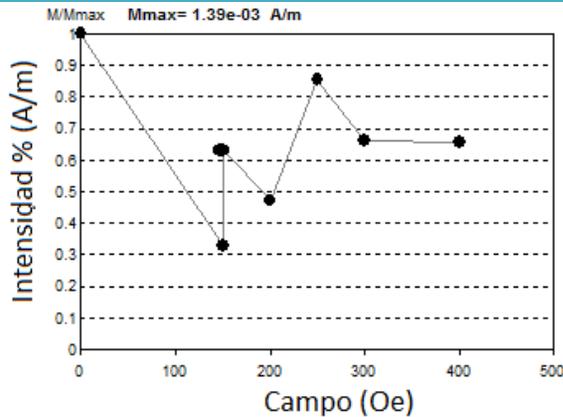
TC2G**TC2G**

Al desmagnetizar el espécimen G se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad crece de forma aleatoria respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe con un traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales.

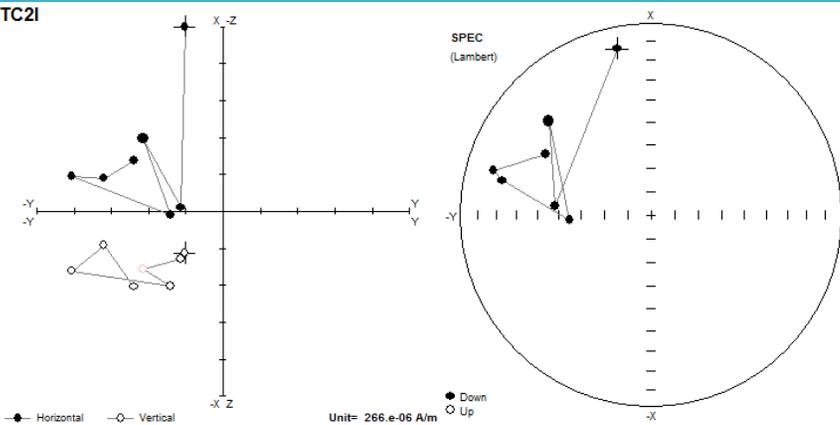
TC2H**TC2H**

Al desmagnetizar el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe con un traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

TC2I

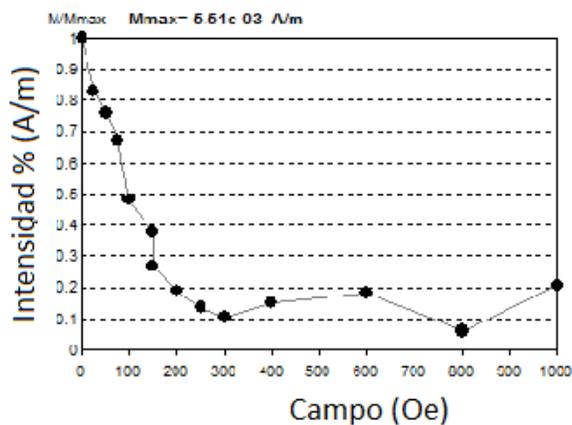


TC2I

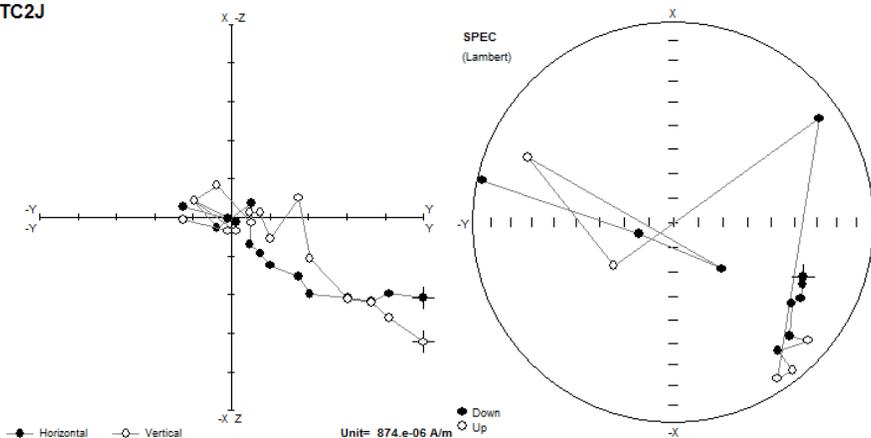


Al desmagnetizar el espécimen I se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad crece y decrece de forma aleatoria respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe con un traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales.

TC2J

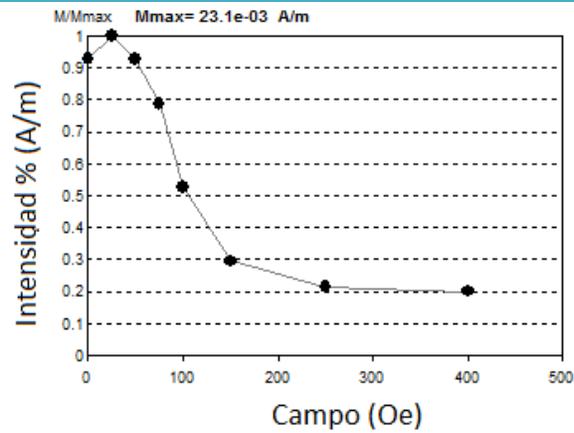


TC2J

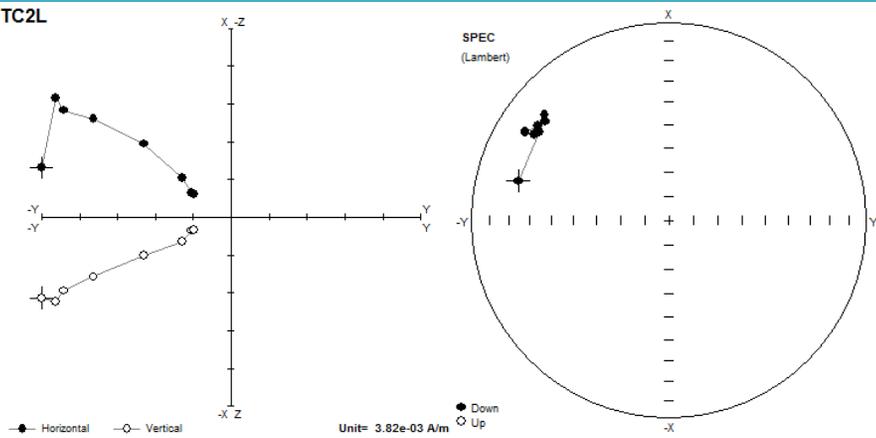


Al desmagnetizar el espécimen J se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece de forma continua respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe con un traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

TC2L

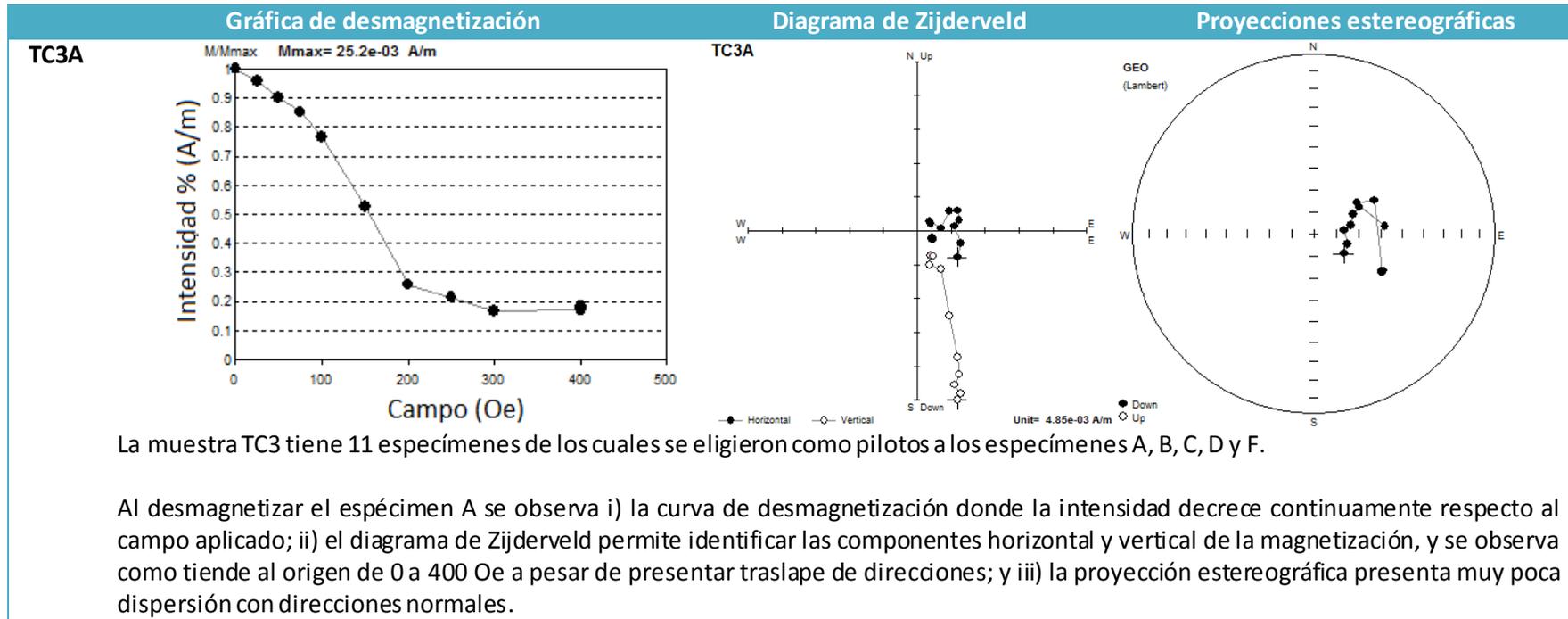


TC2L

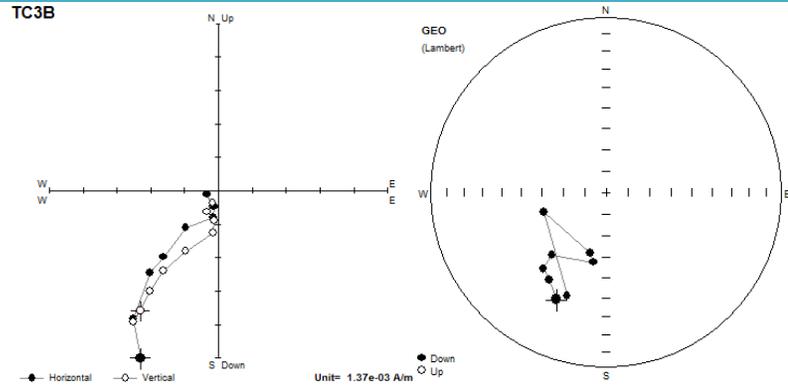
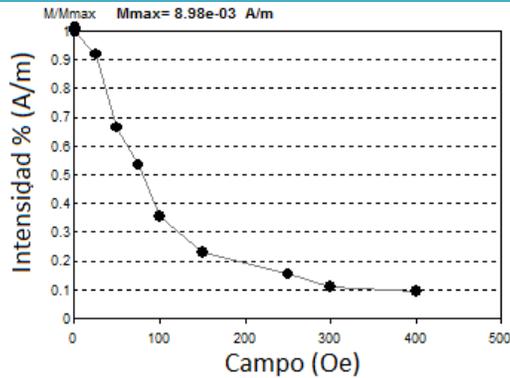


Al desmagnetizar el espécimen L se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece de forma continua respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales.

Tabla 3. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC3.

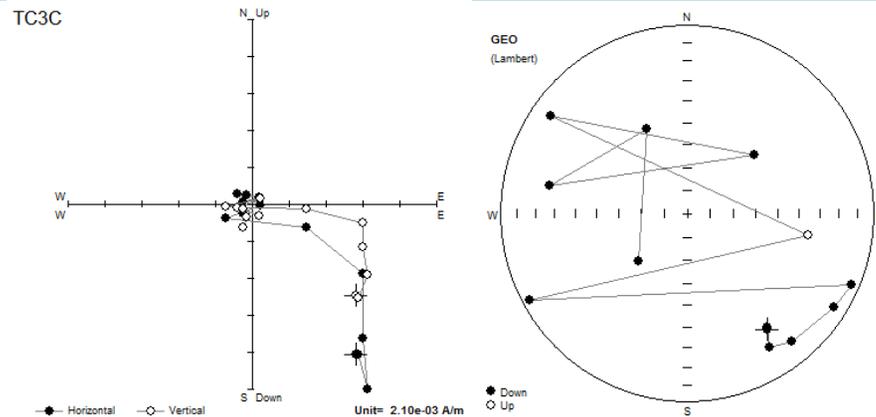
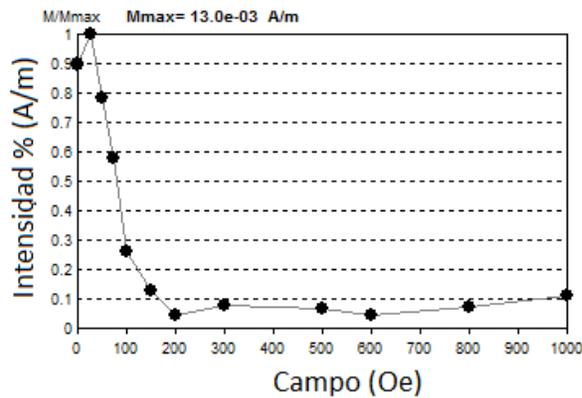


TC3B



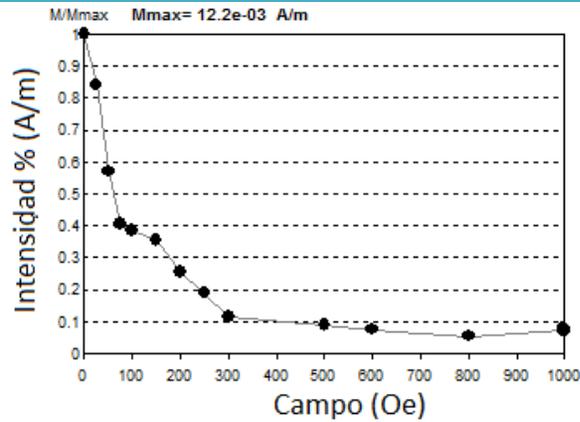
Al desmagnetizar el espécimen B se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC3C

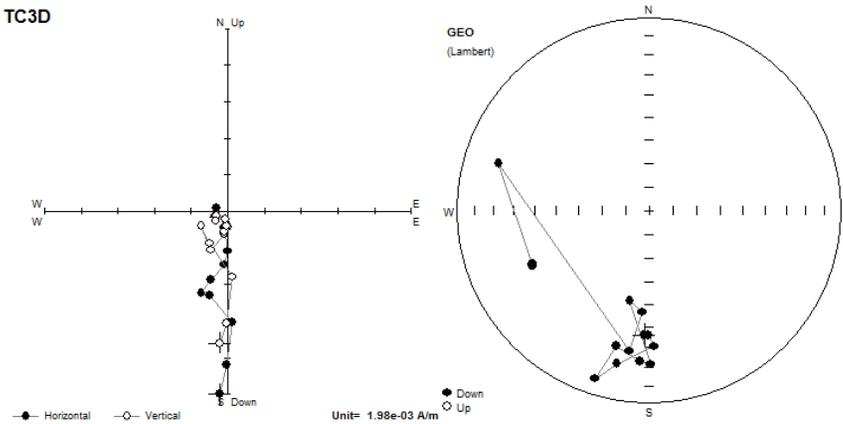


Al desmagnetizar el espécimen C se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

TC3D

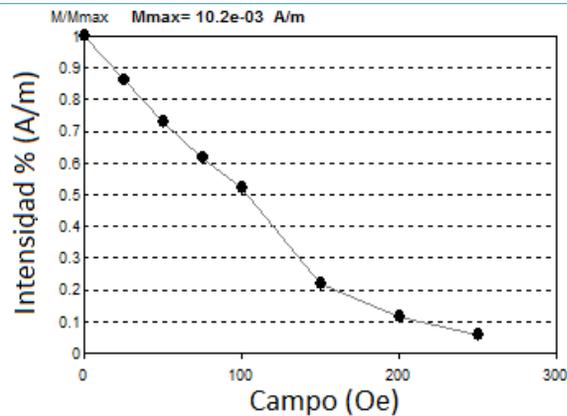


TC3D

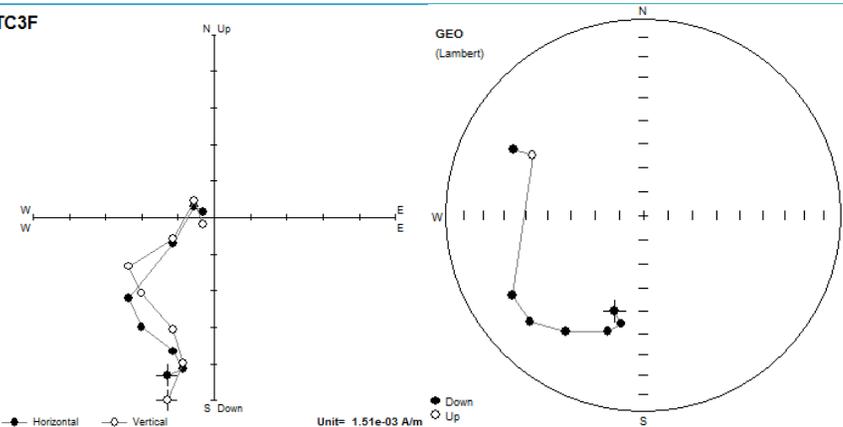


Al desmagnetizar el espécimen D se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC3F

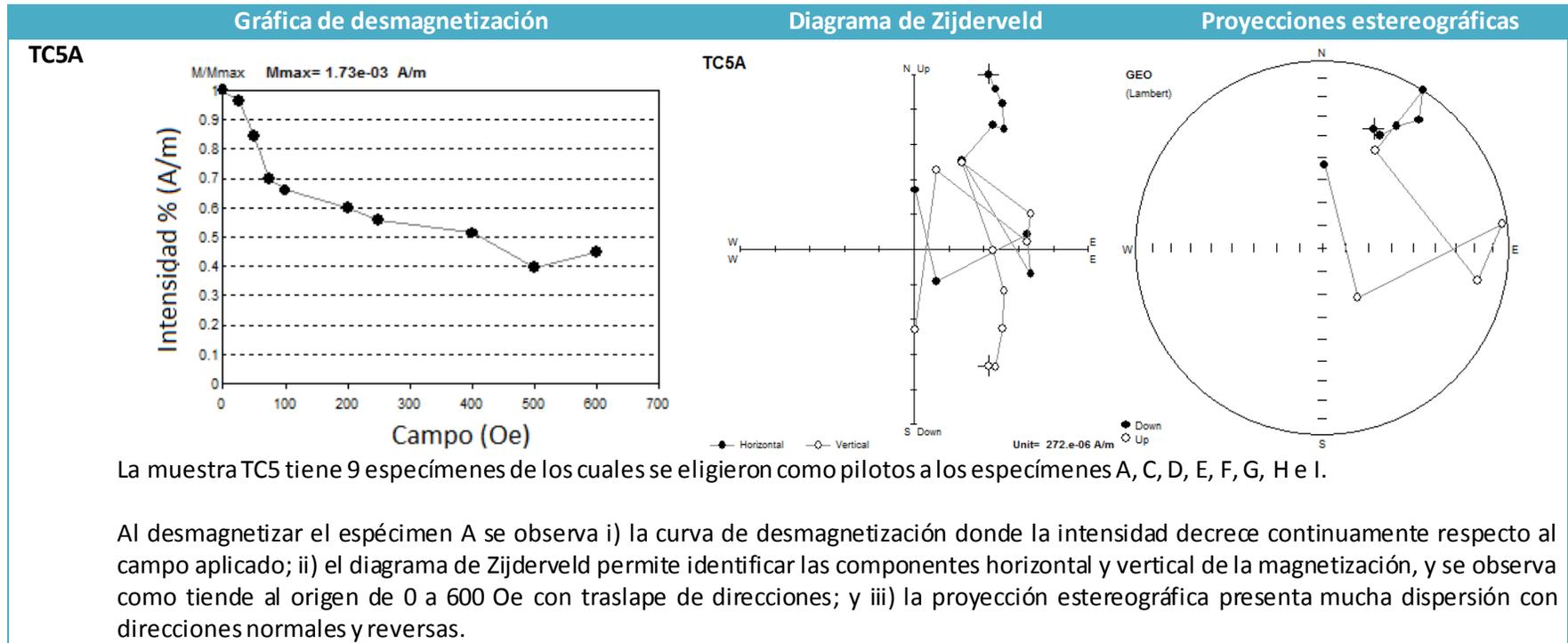


TC3F

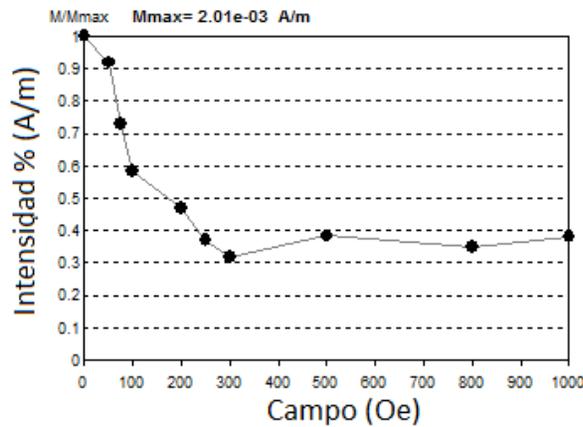


Al desmagnetizar el espécimen F se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

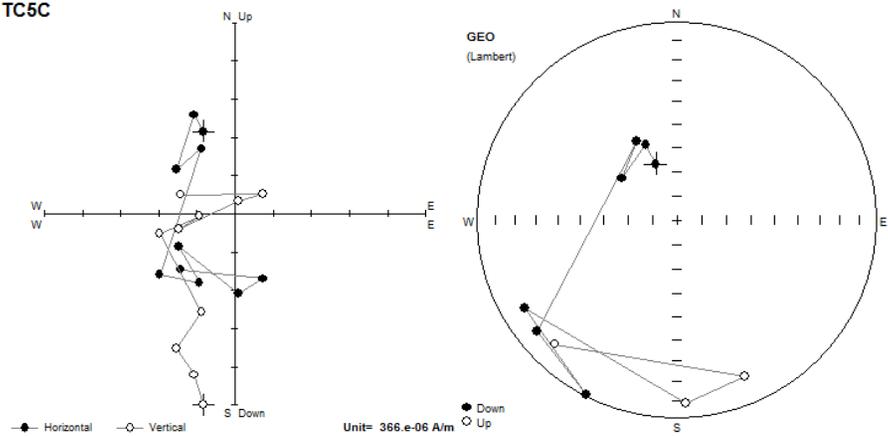
Tabla 4. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC5.



TC5C

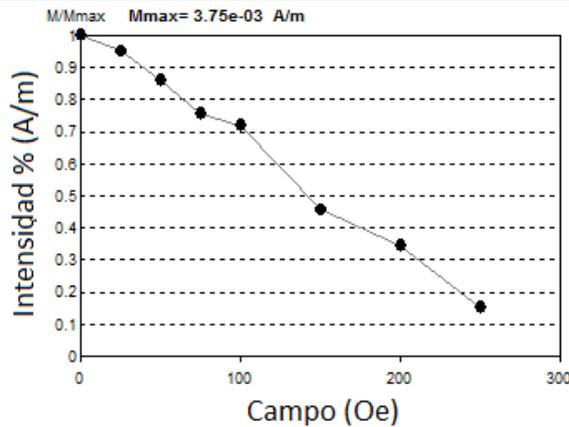


TC5C

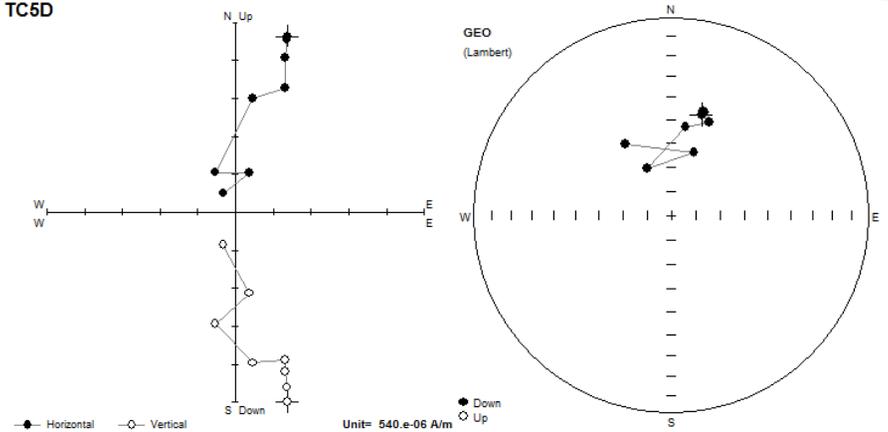


Al desmagnetizar el espécimen C se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

TC5D

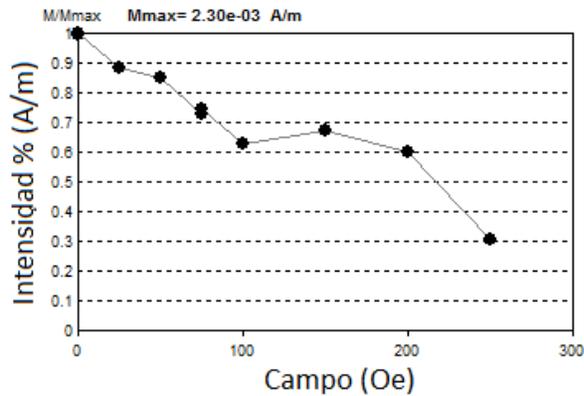


TC5D

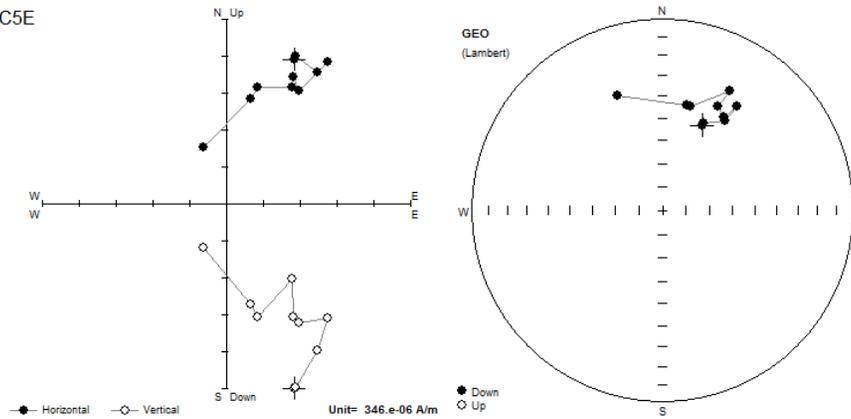


Al desmagnetizar el espécimen D se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales.

TC5E

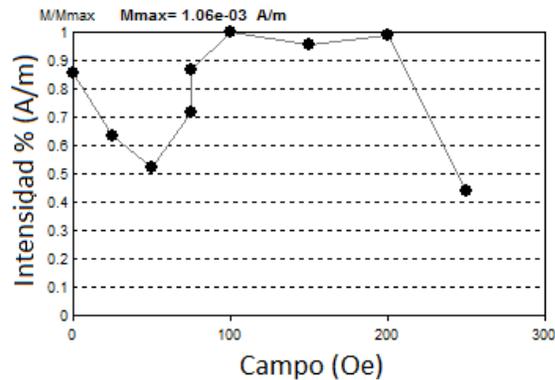


TC5E

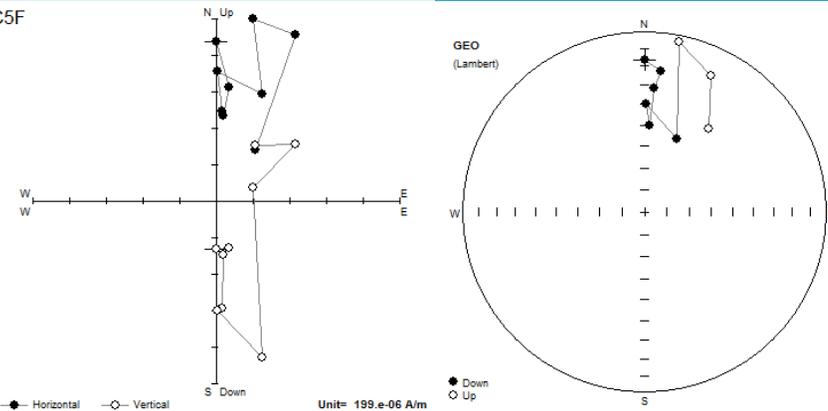


Al desmagnetizar el espécimen E se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales.

TC5F

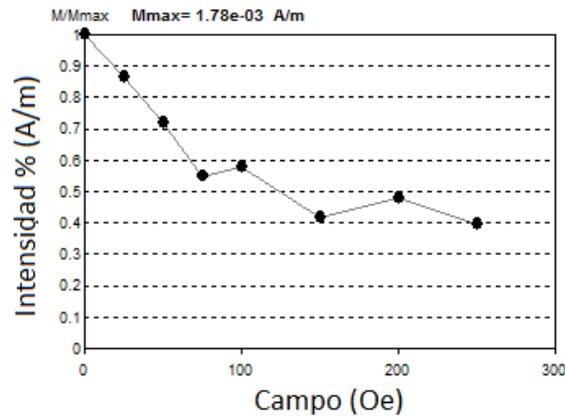


TC5F

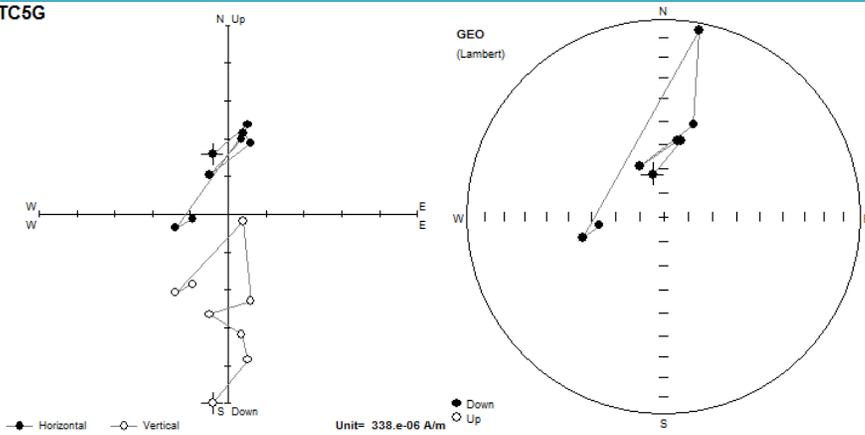


Al desmagnetizar el espécimen F se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece y decrece de forma aleatoria respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales y reversas.

TC5G

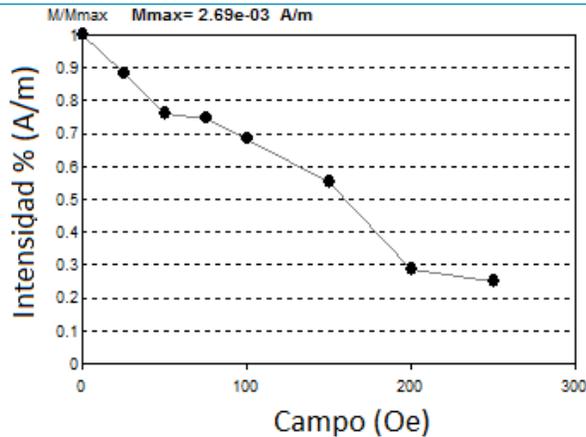


TC5G

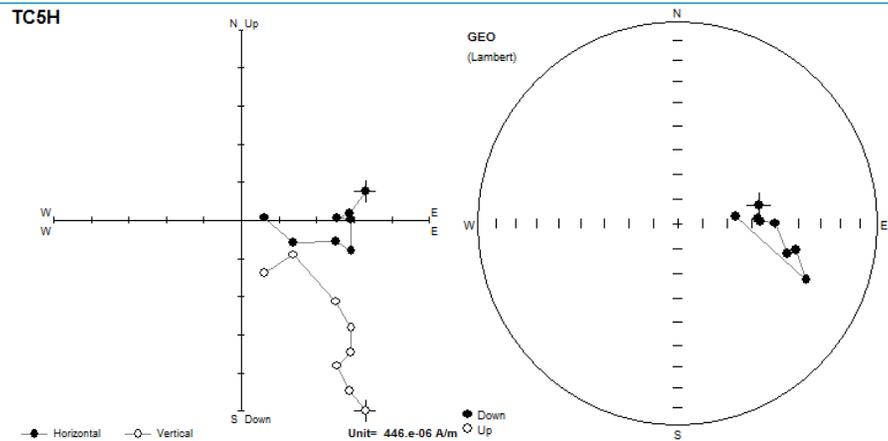


Al desmagnetizar el espécimen G se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales.

TC5H

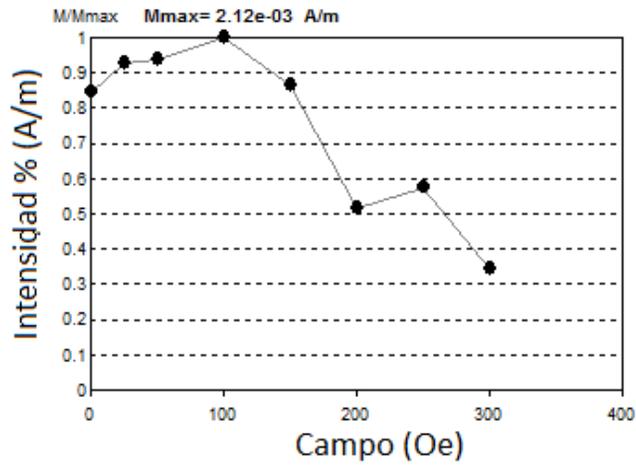


TC5H

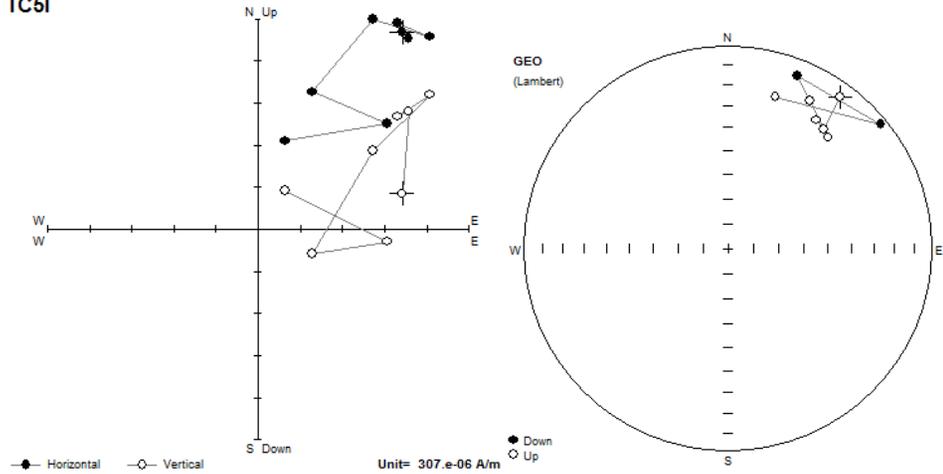


Al desmagnetizar el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales.

TC5I

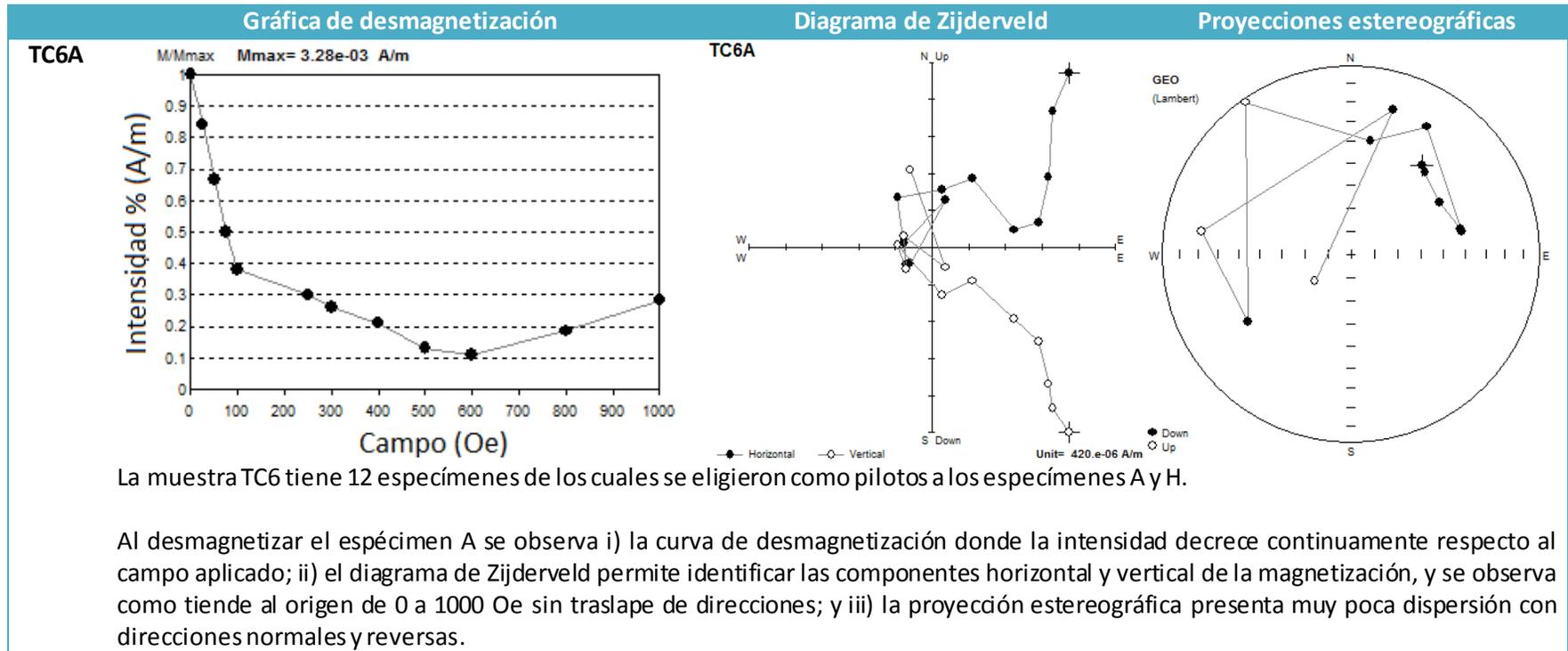


TC5I

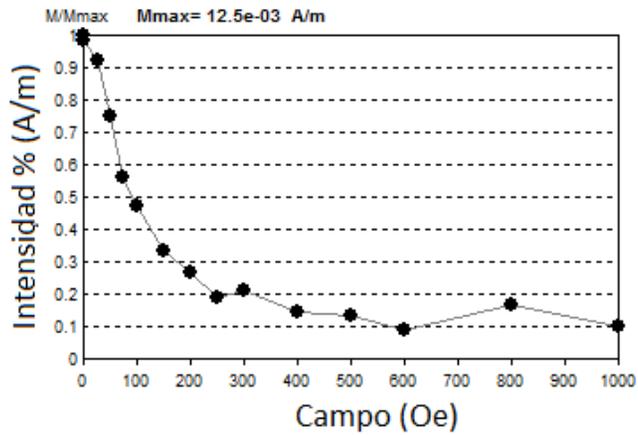


Al desmagnetizar el espécimen I se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 300 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales y reversas.

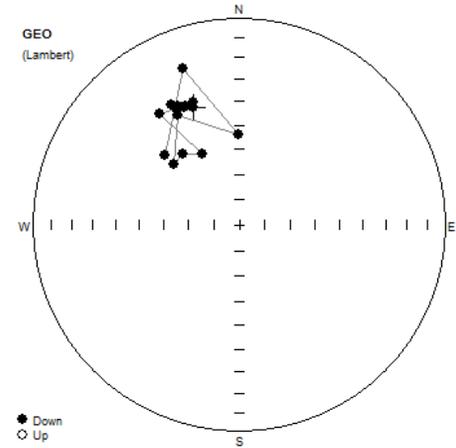
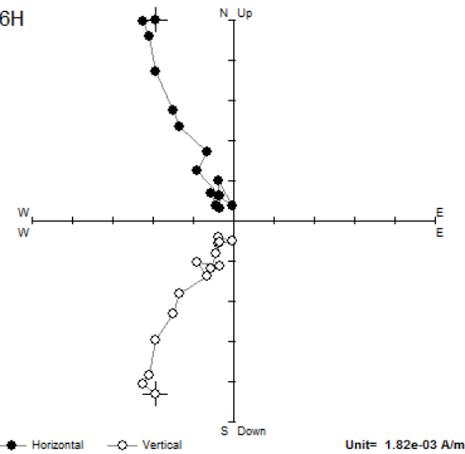
Tabla 5. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC6.



TC6H

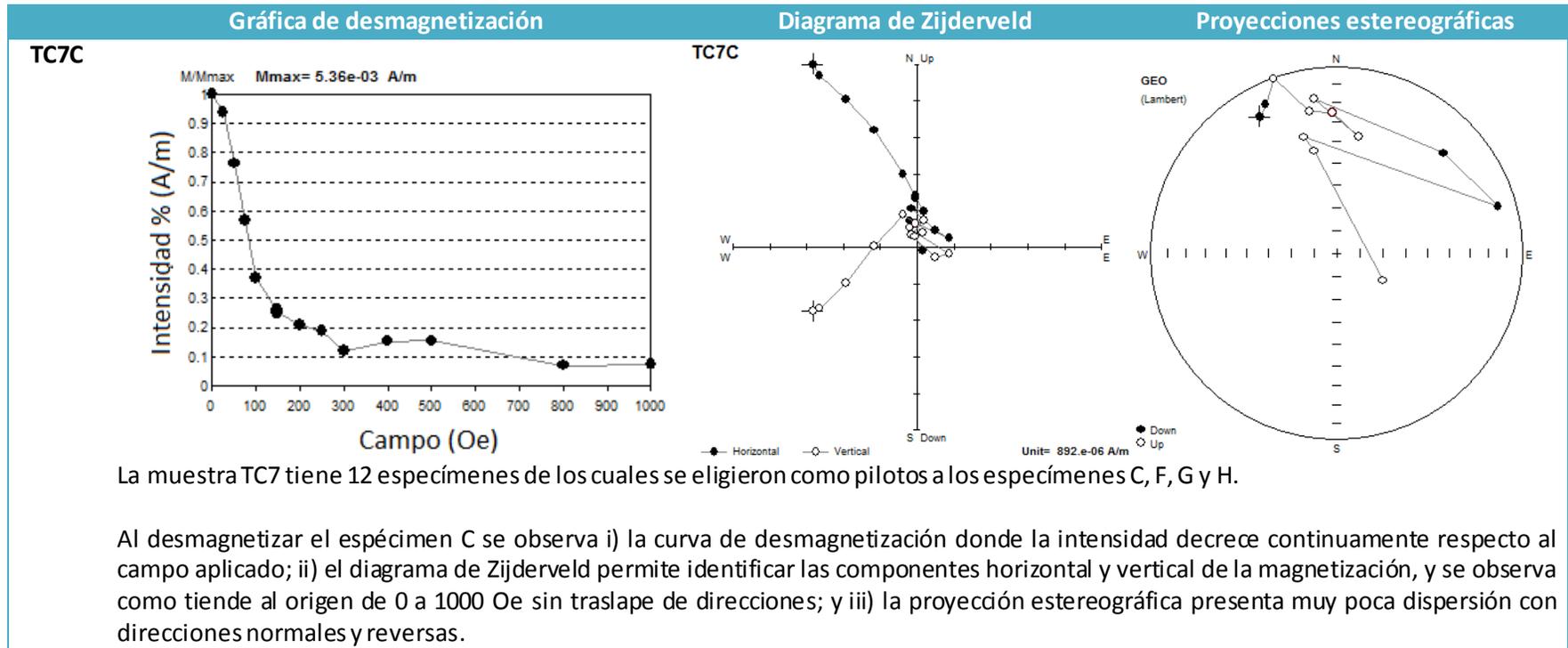


TC6H

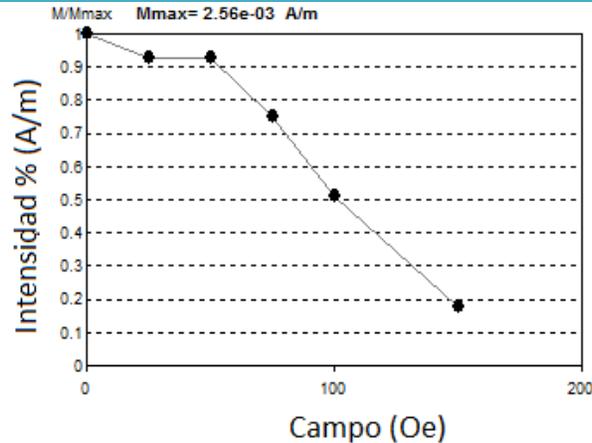


Al desmagnetizar el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

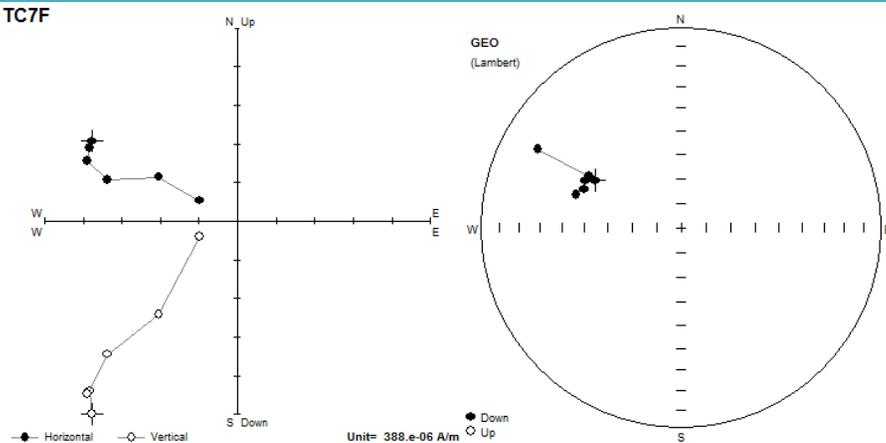
Tabla 6. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC7.



TC7F

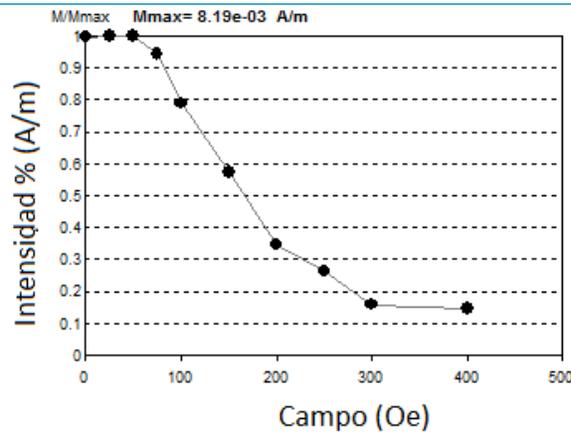


TC7F

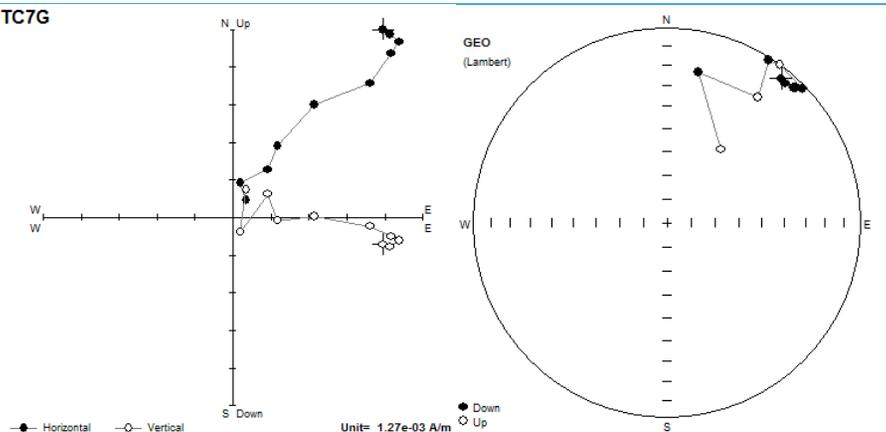


Al desmagnetizar el espécimen F se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 150 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC7G

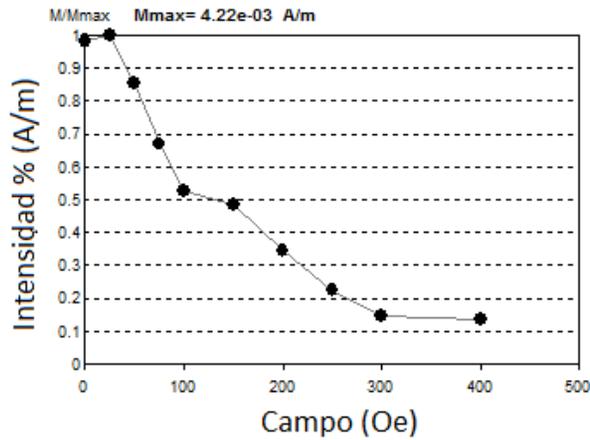


TC7G

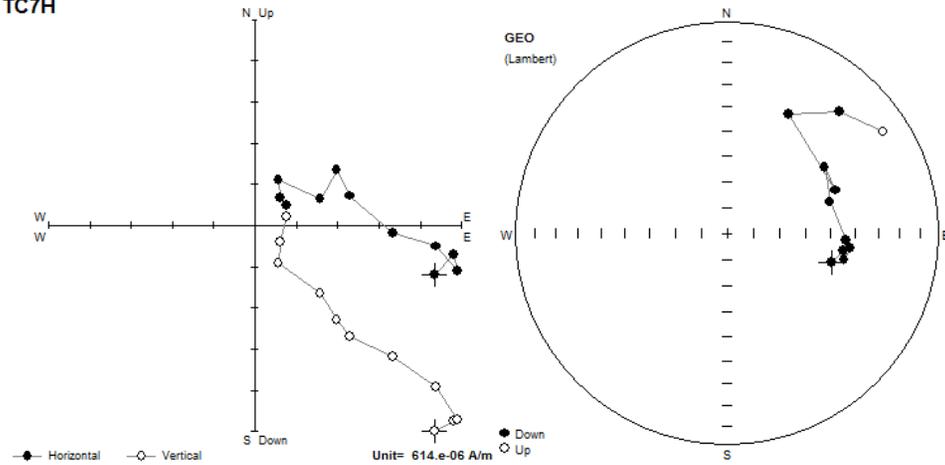


Al desmagnetizar el espécimen G se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales y reversas.

TC7H

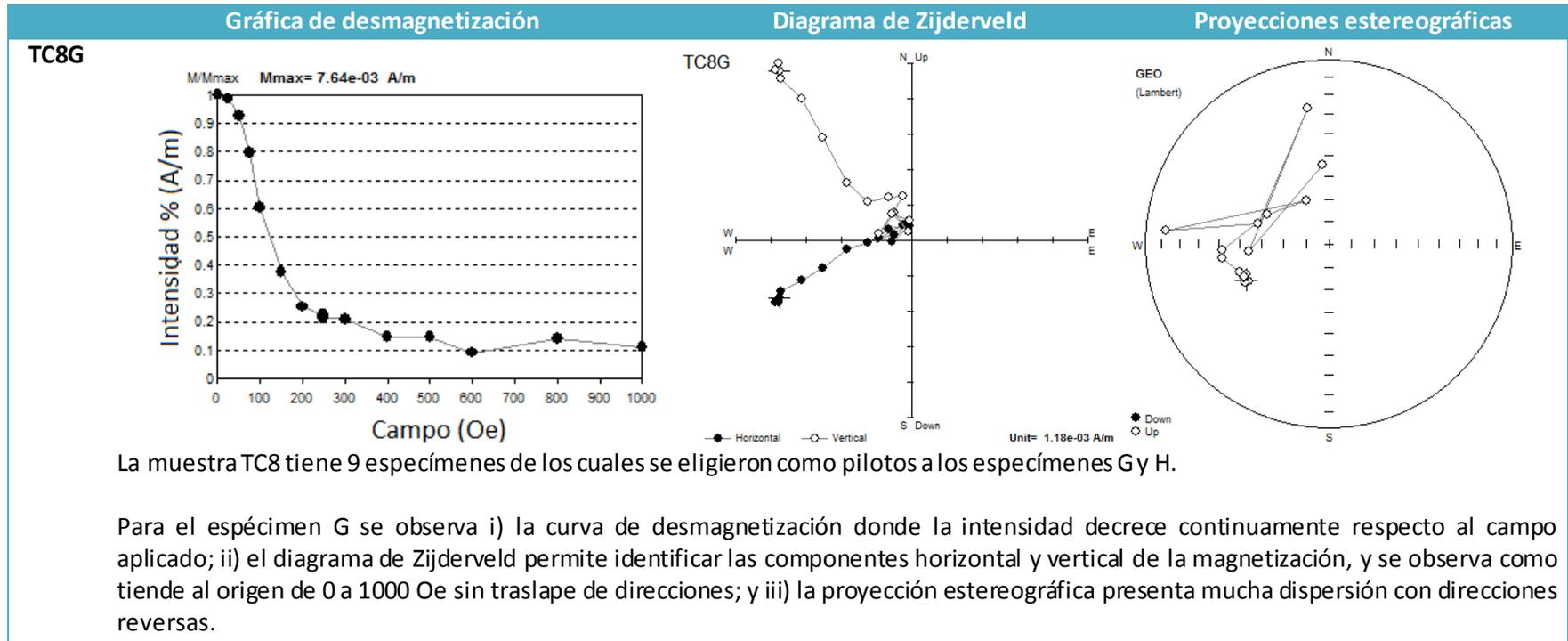


TC7H

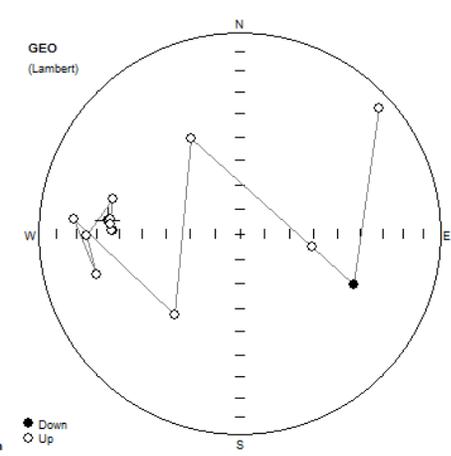
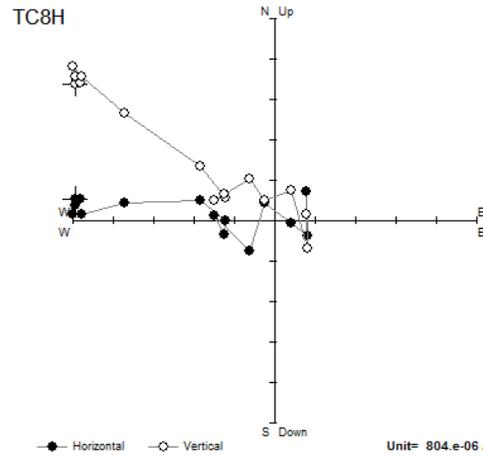
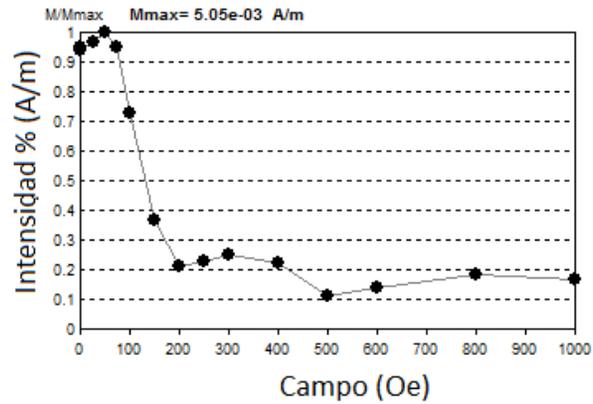


Al desmagnetizar el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales y reversas.

Tabla 7. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC8.

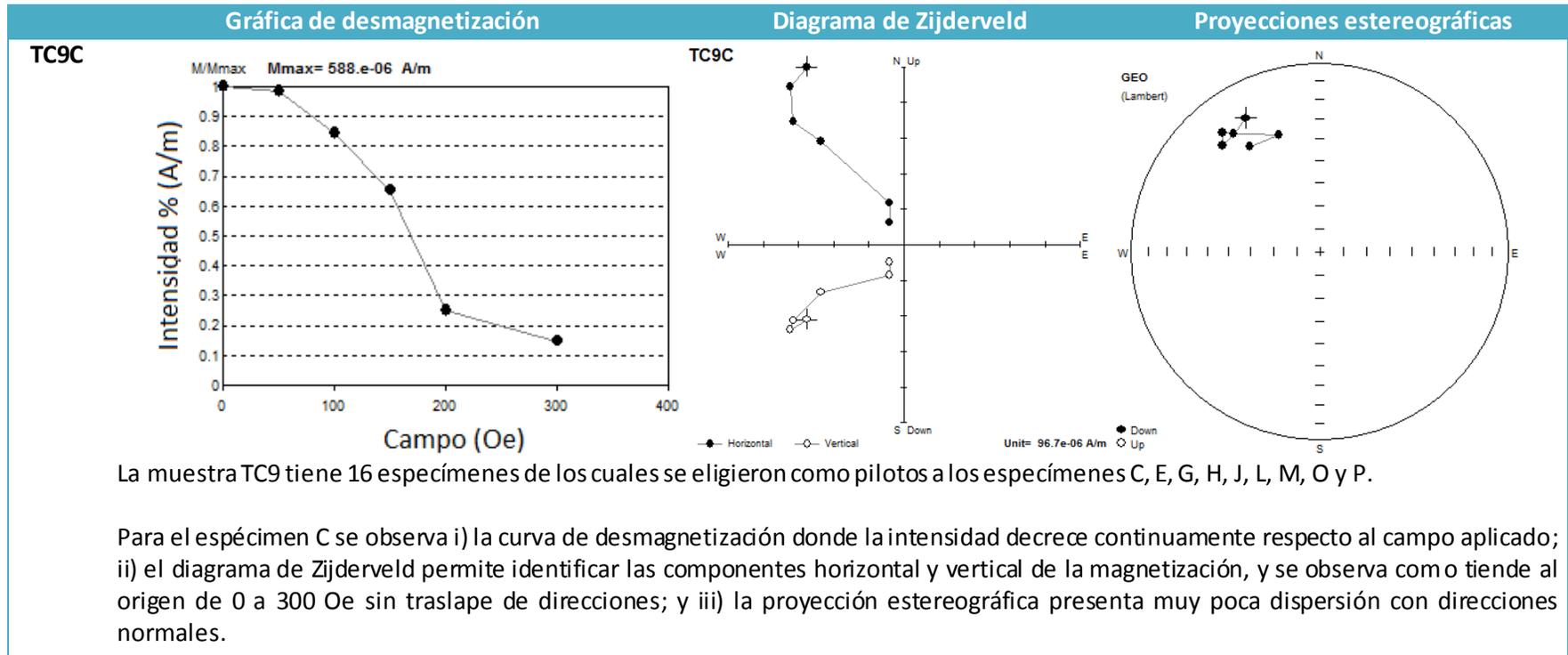


TC8H

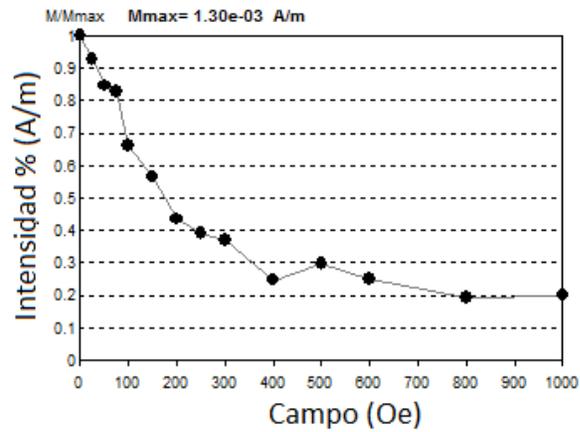


Para el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

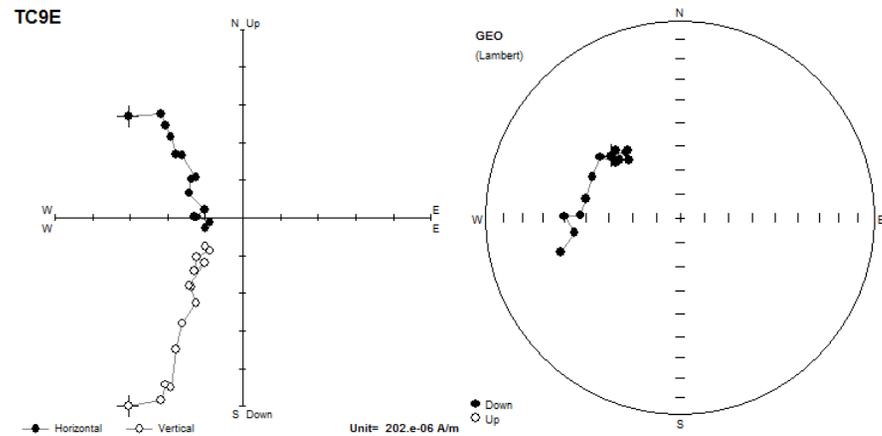
Tabla 8. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC9.



TC9E

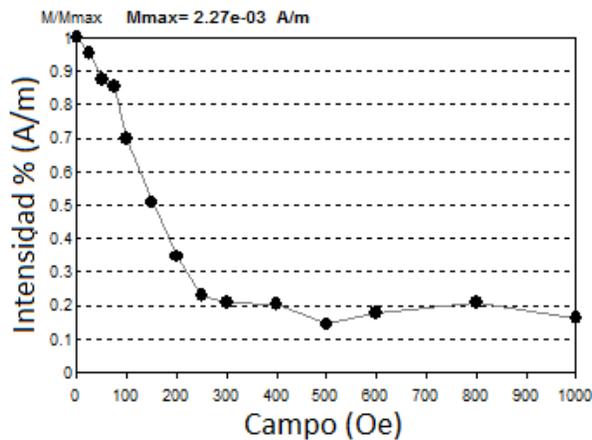


TC9E

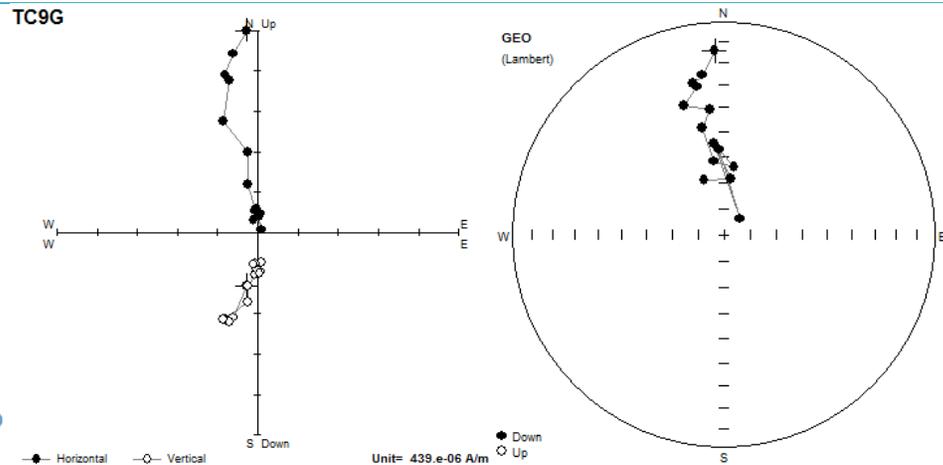


Para el espécimen E se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 300 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC9G

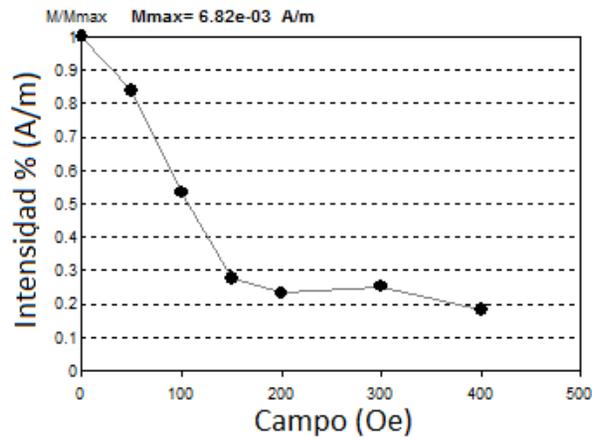


TC9G

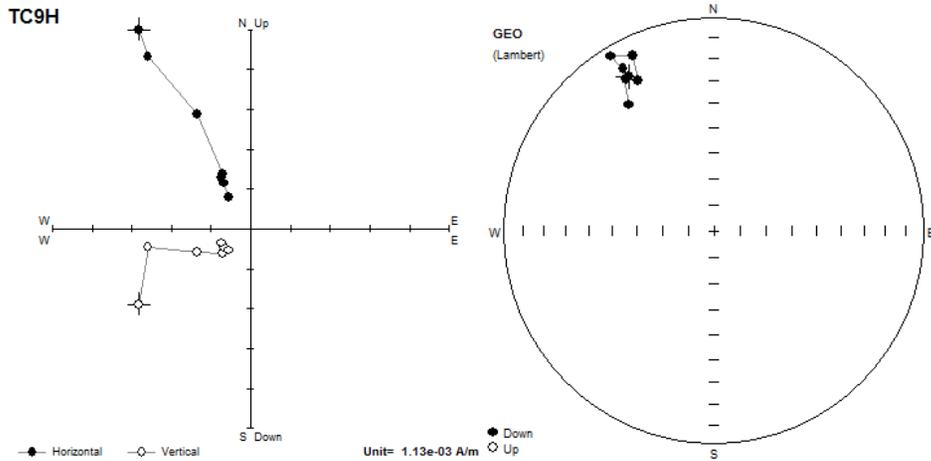


Para el espécimen G se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC9H

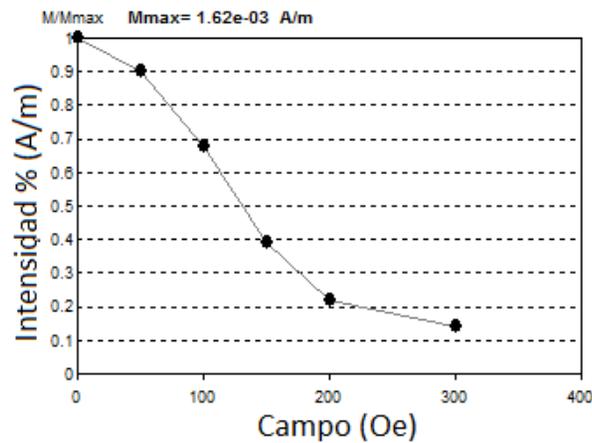


TC9H

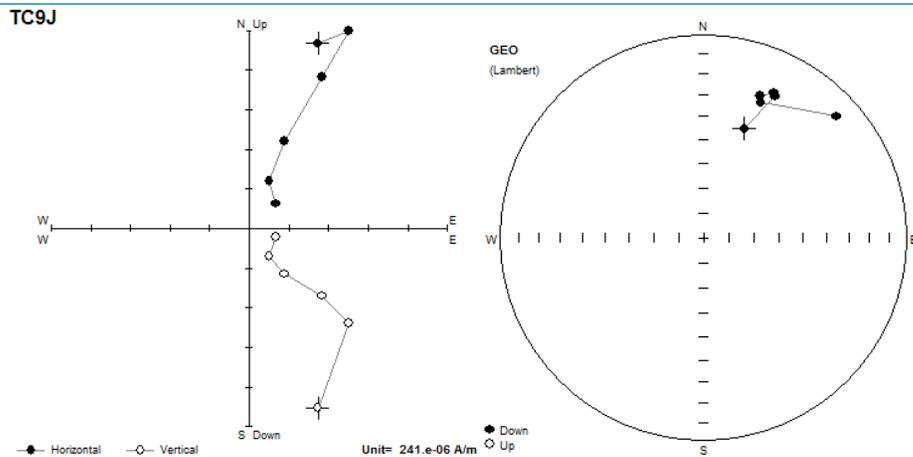


Para el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

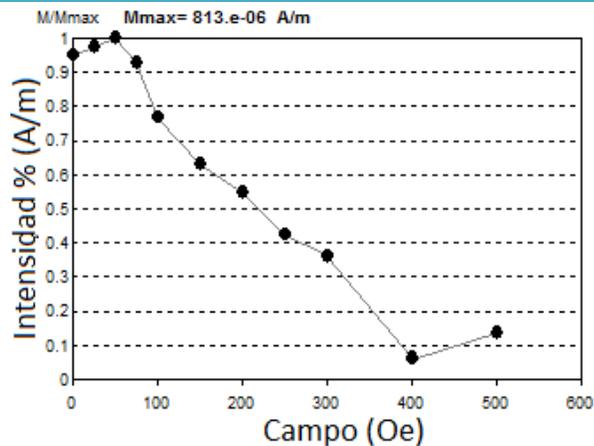
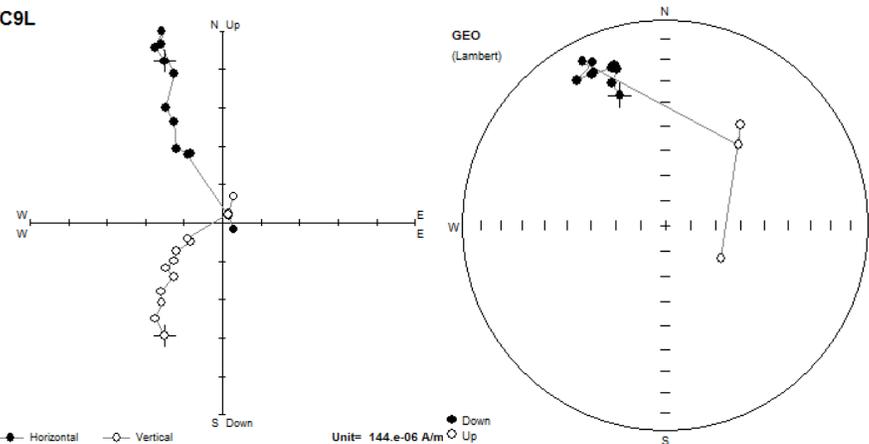
TC9J



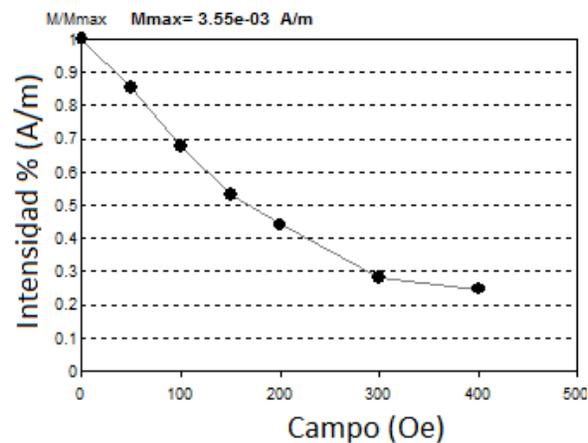
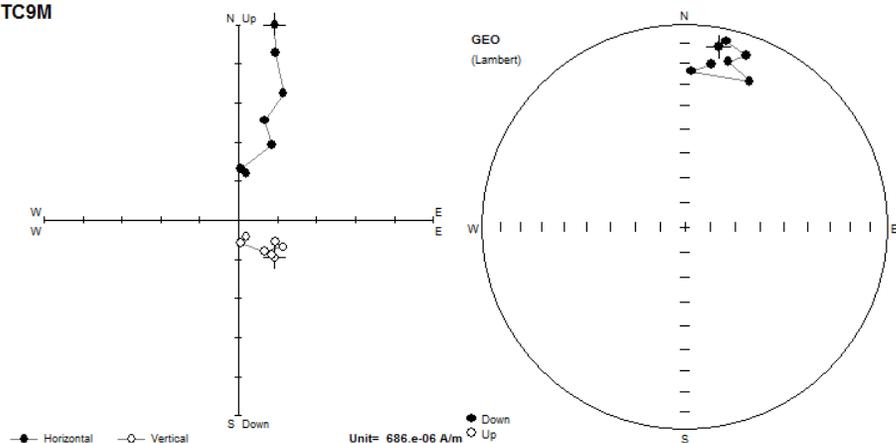
TC9J



Para el espécimen J se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 300 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

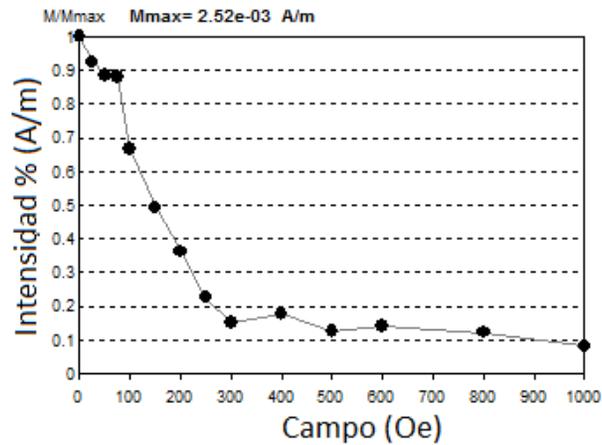
TC9L**TC9L**

Para el espécimen L se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 500 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales y reversas.

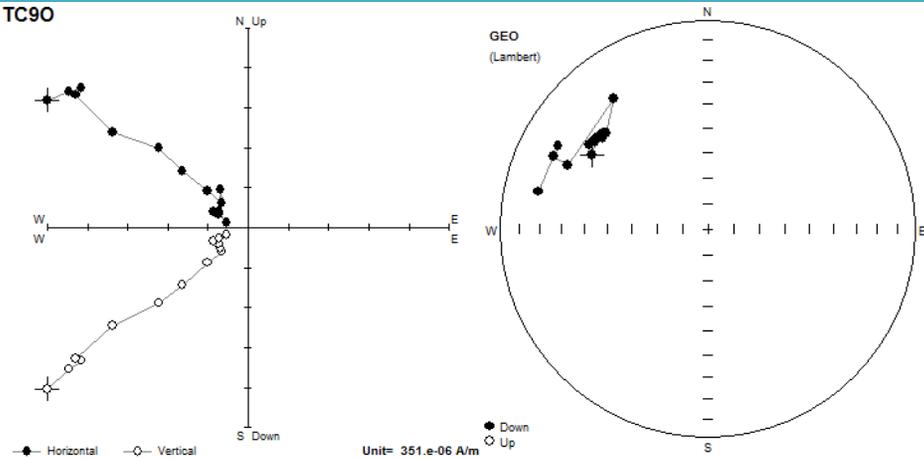
TC9M**TC9M**

Para el espécimen M se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC90

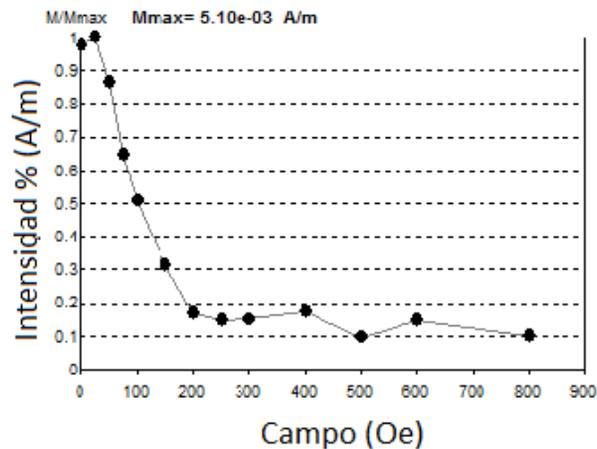


TC90

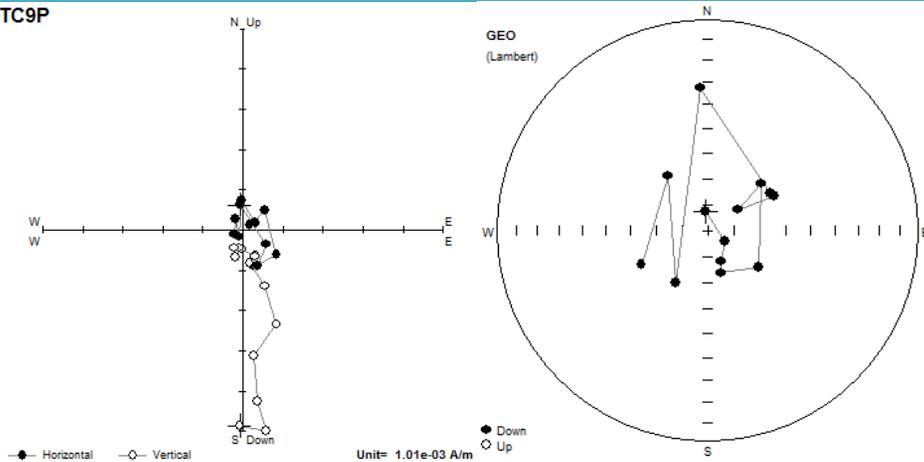


Para el espécimen O se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC9P

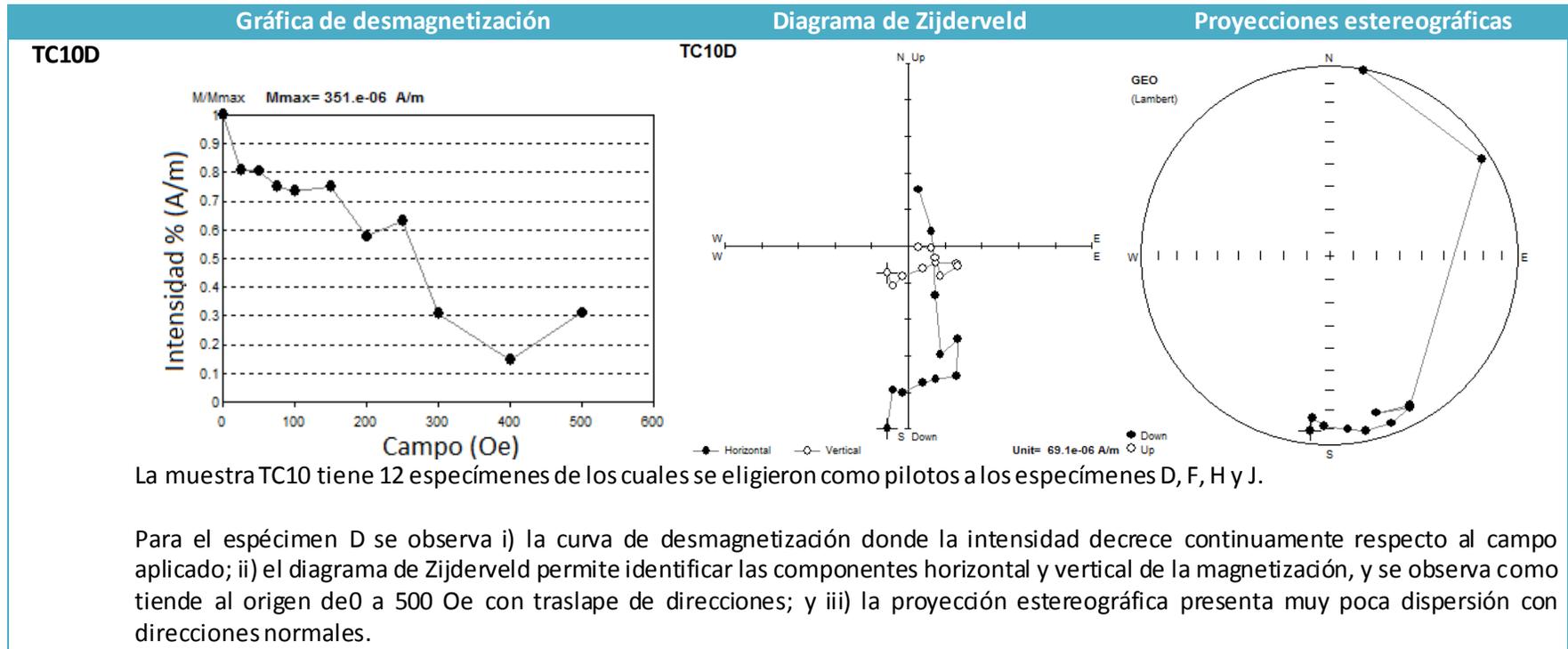


TC9P

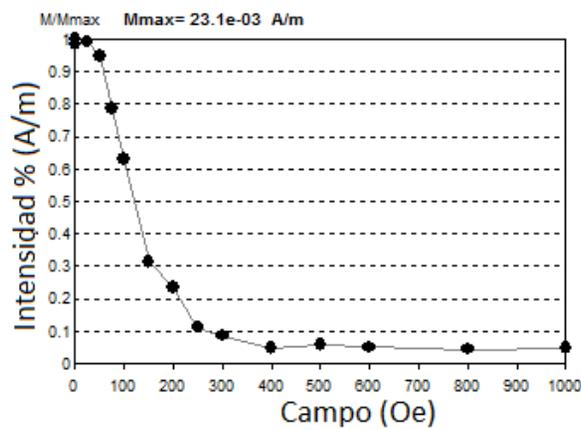


Para el espécimen P se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 800 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales.

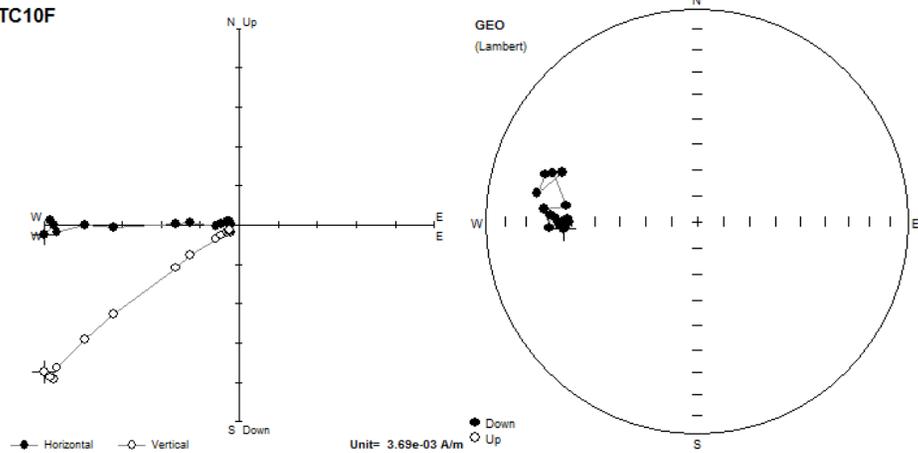
Tabla 9. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC10.



TC10F

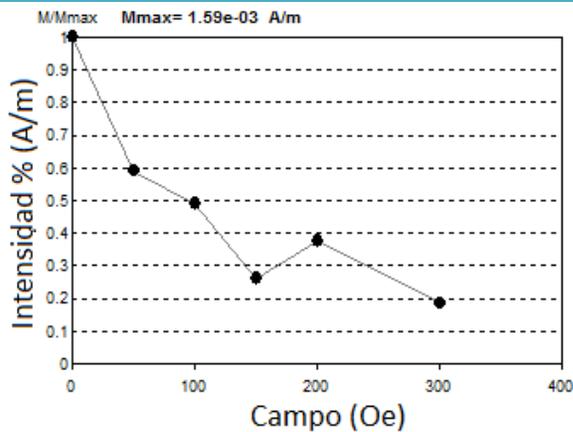


TC10F

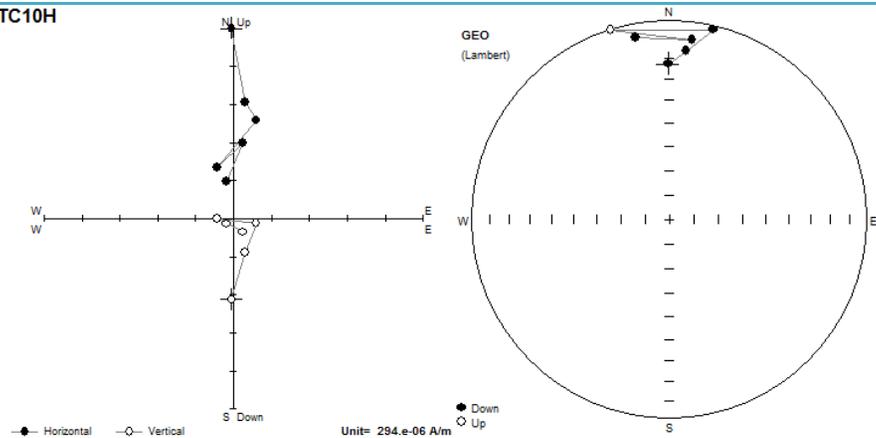


Para el espécimen F se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 1000 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC10H

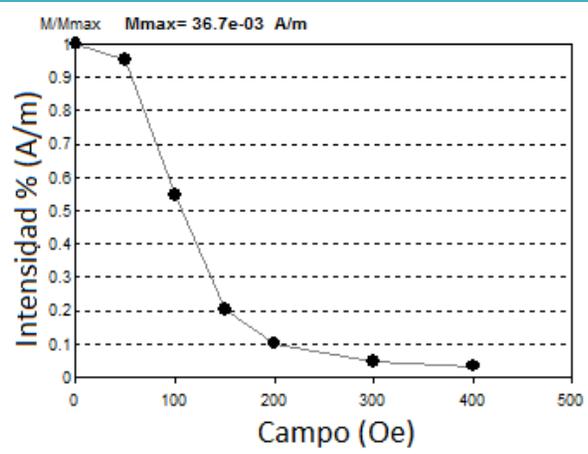


TC10H

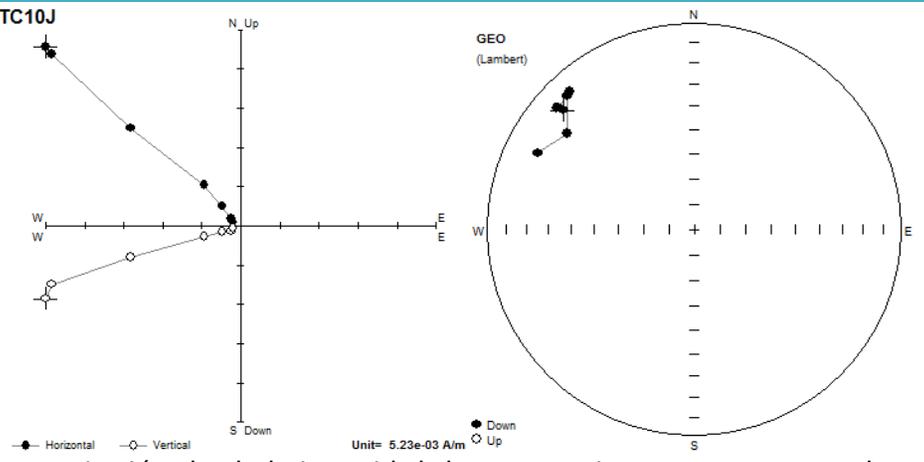


Para el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 300 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC10J

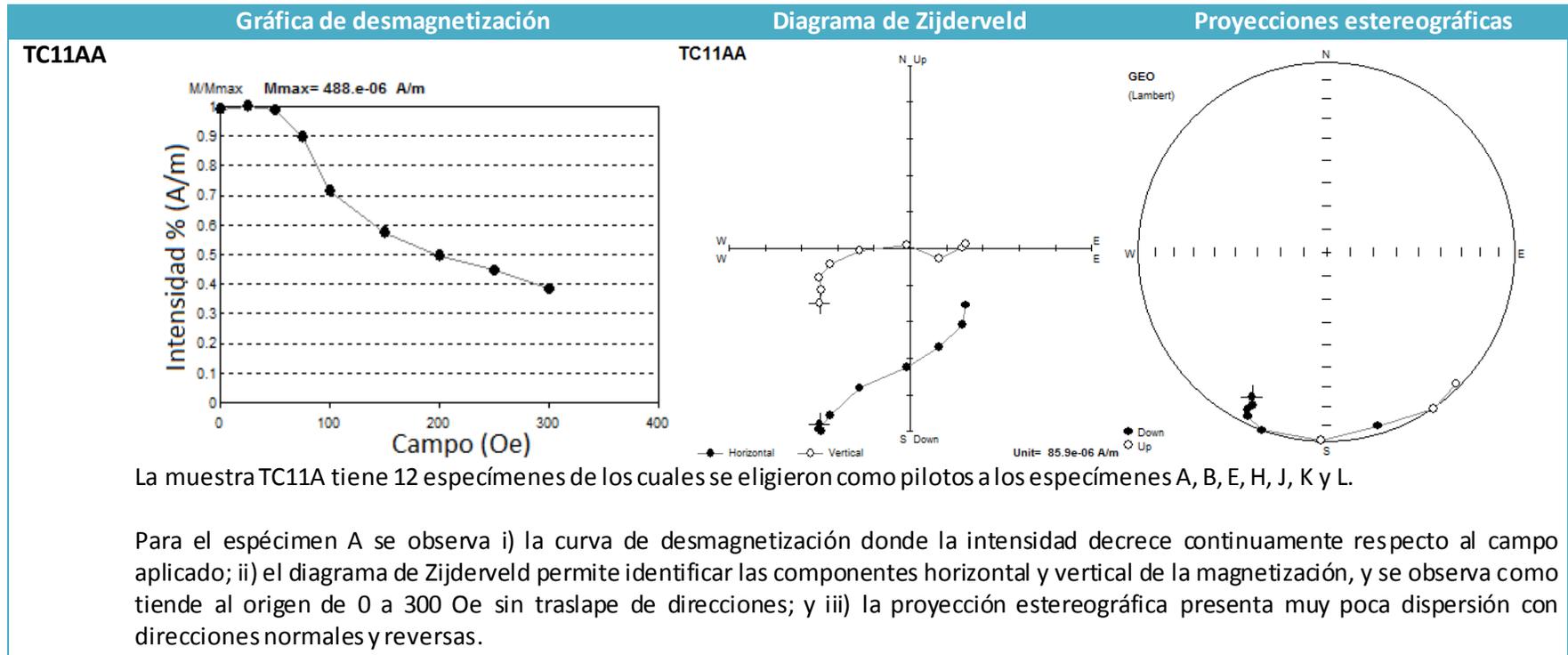


TC10J

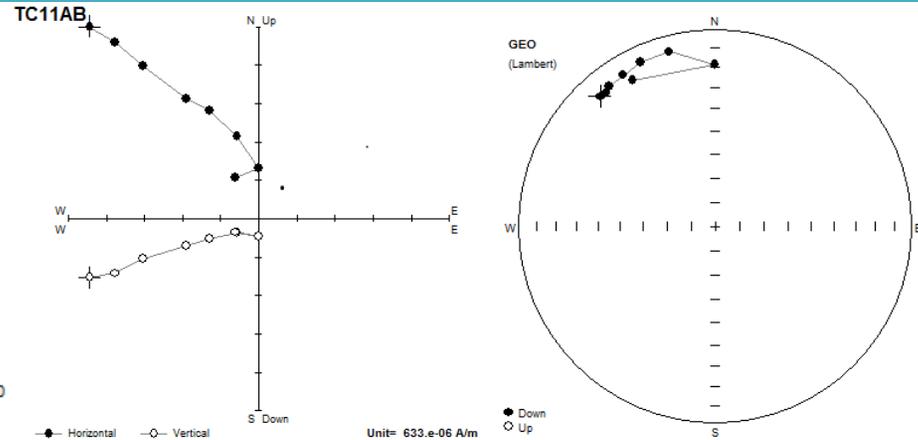
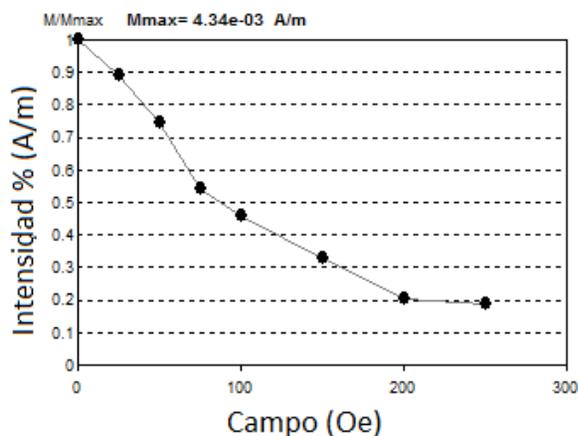


Para el espécimen J se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

Tabla 10 Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC11A.

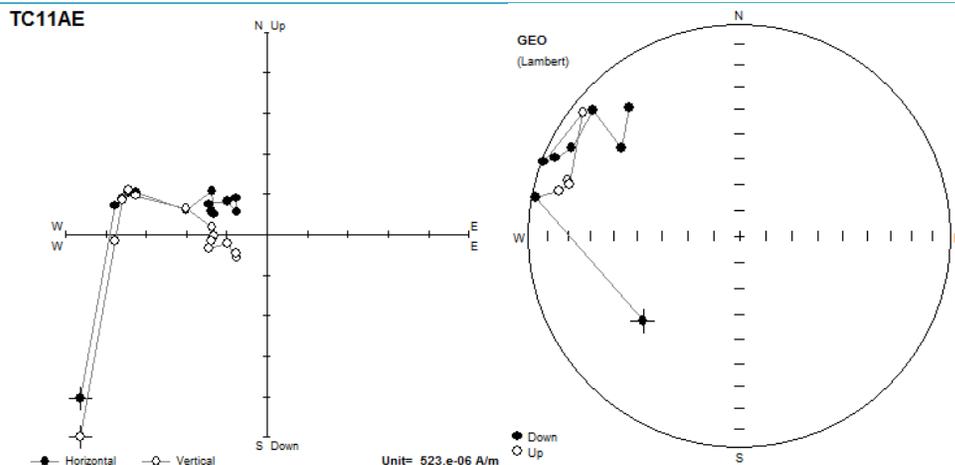
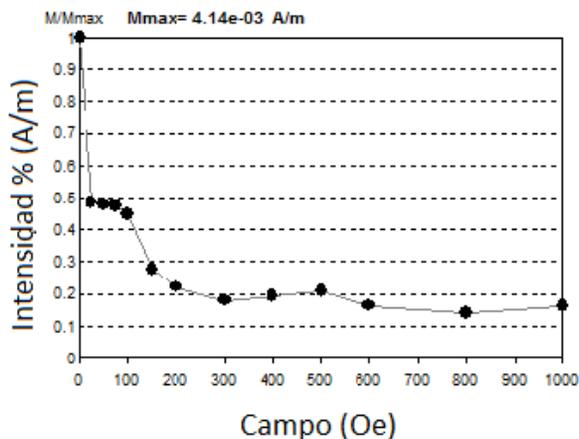


TC11AB



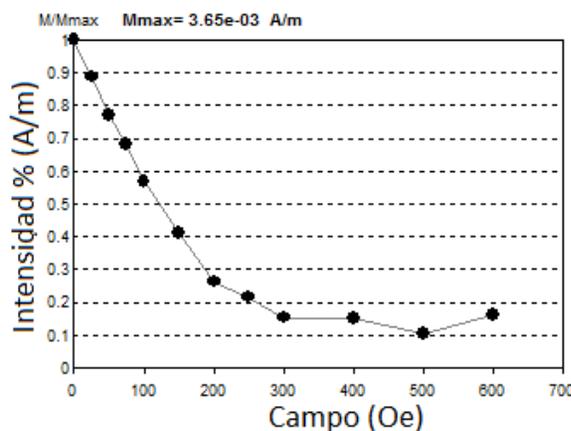
Para el espécimen B se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

TC11AE

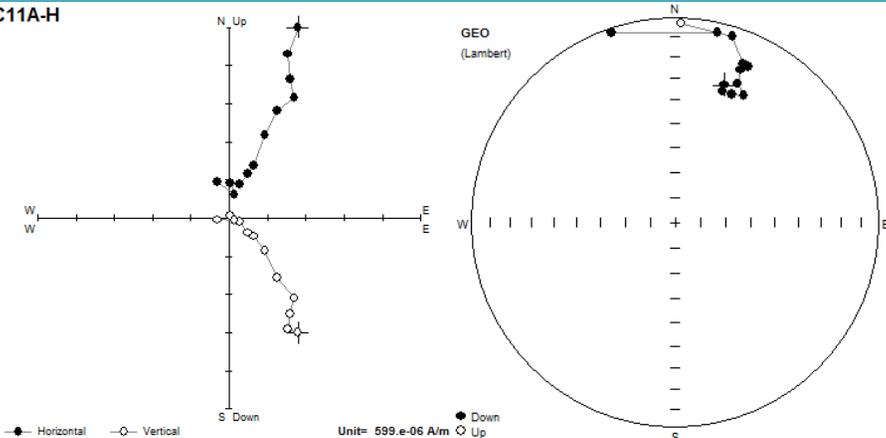


Para el espécimen E se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

TC11AH

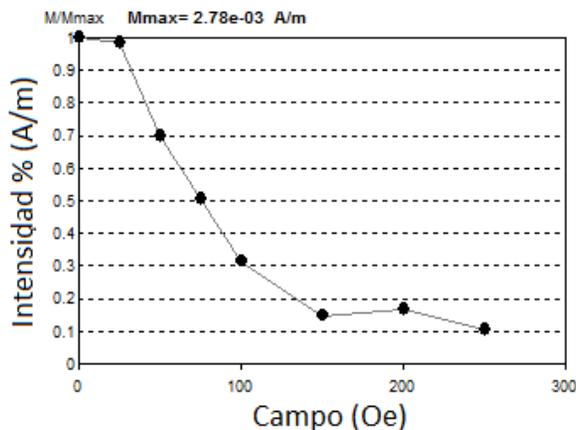


TC11A-H

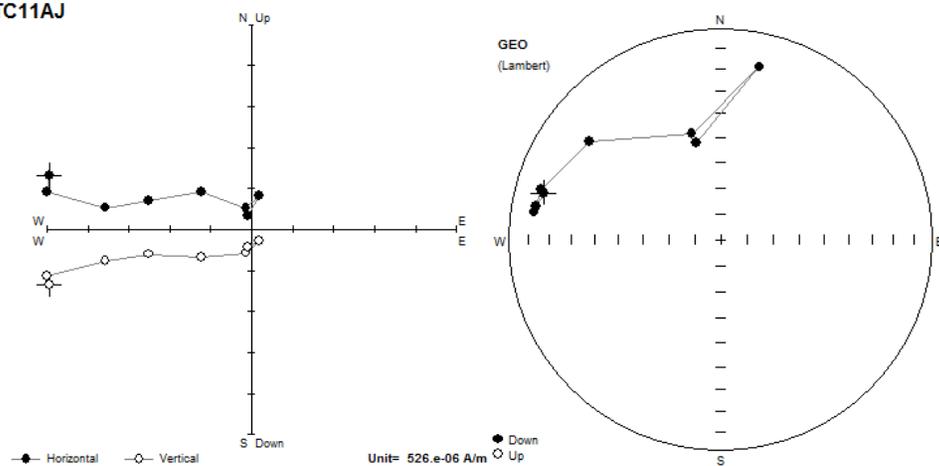


Para el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 600 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales y reversas.

TC11AJ

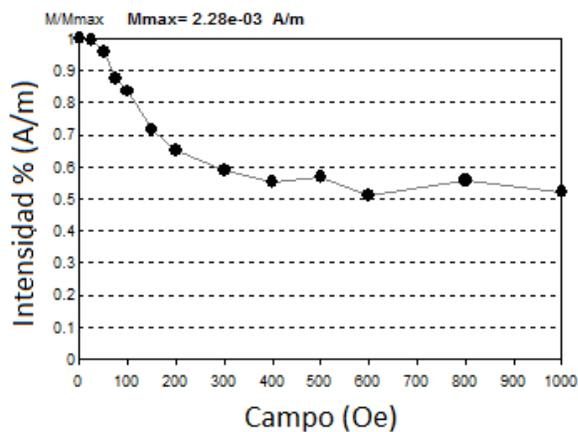


TC11AJ

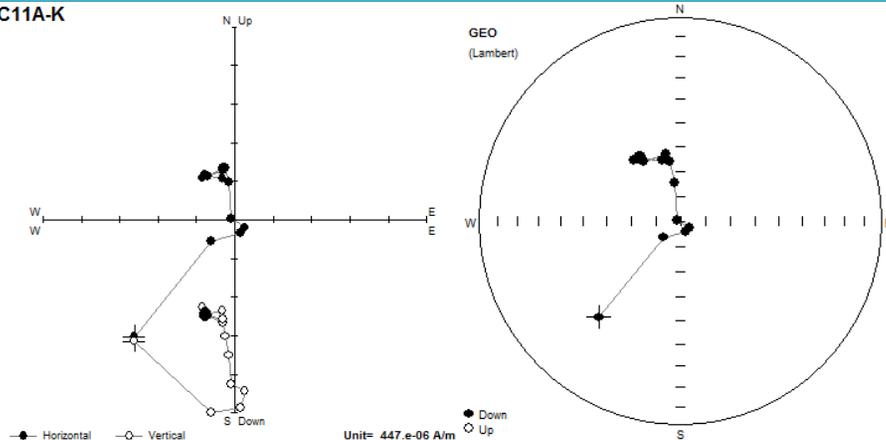


Para el espécimen J se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales y reversas.

TC11AK

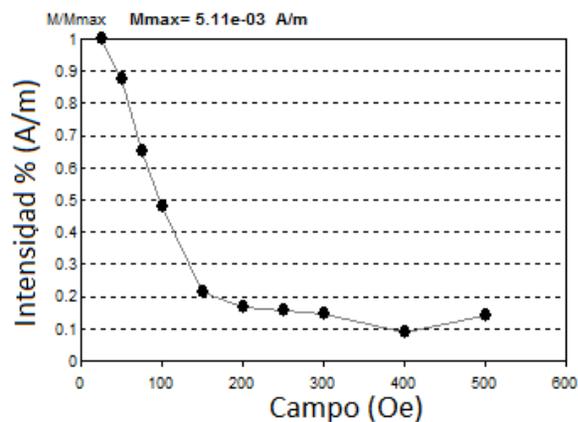


TC11A-K

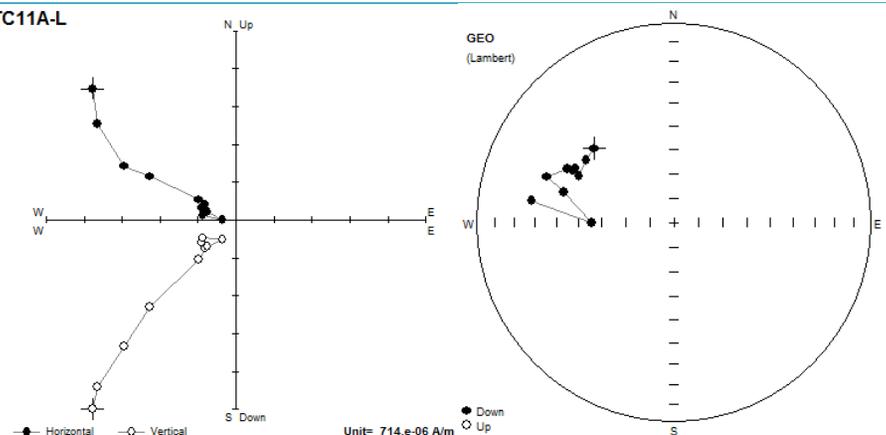


Para el espécimen K se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe con traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales.

TC11AL

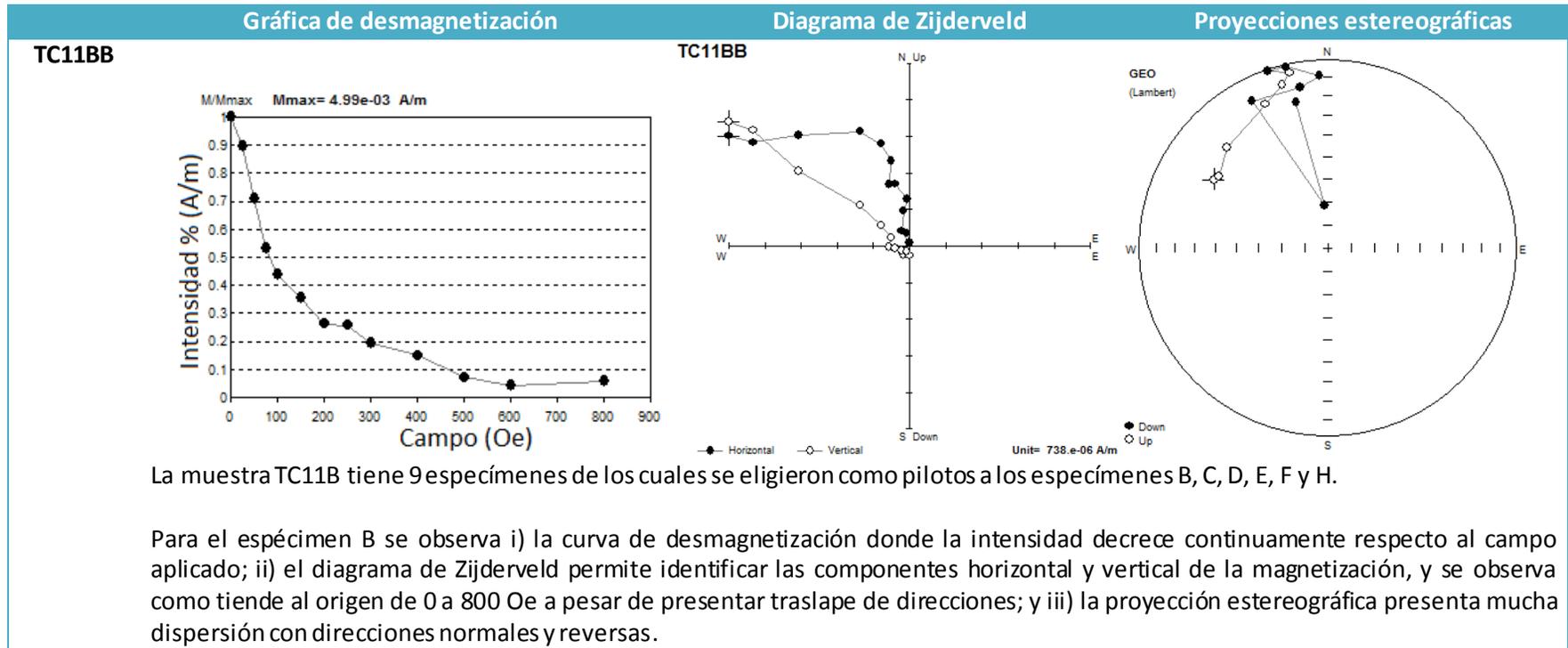


TC11A-L

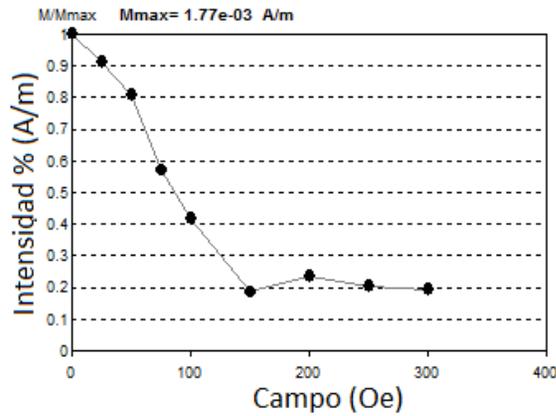


Para el espécimen L se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 500 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta muy poca dispersión con direcciones normales.

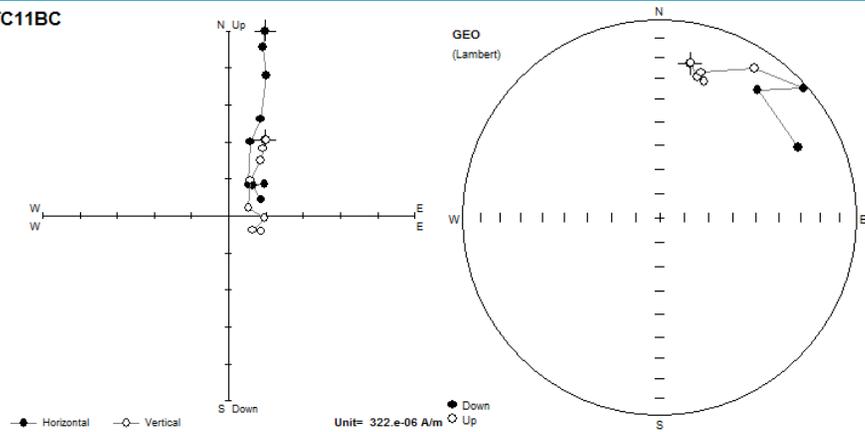
Tabla 11. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC11B.



TC11BC

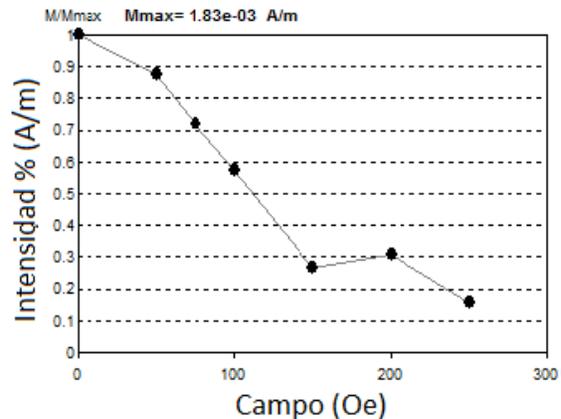


TC11BC

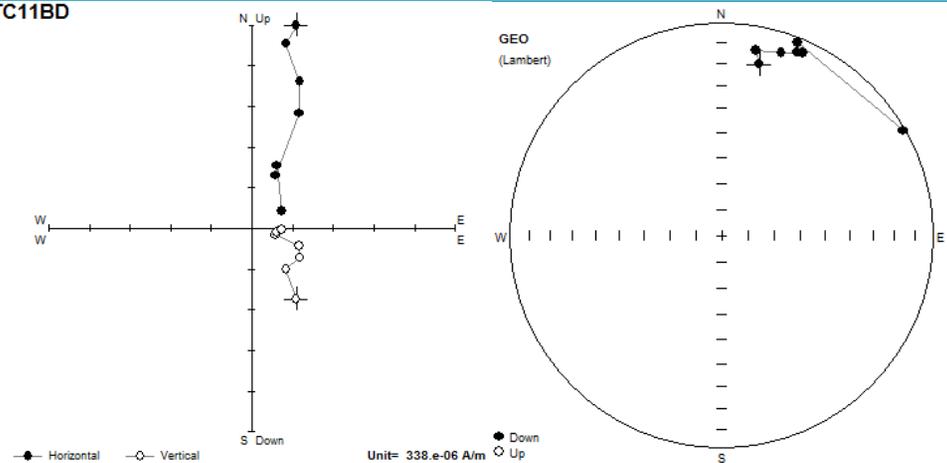


Para el espécimen B se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 300 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

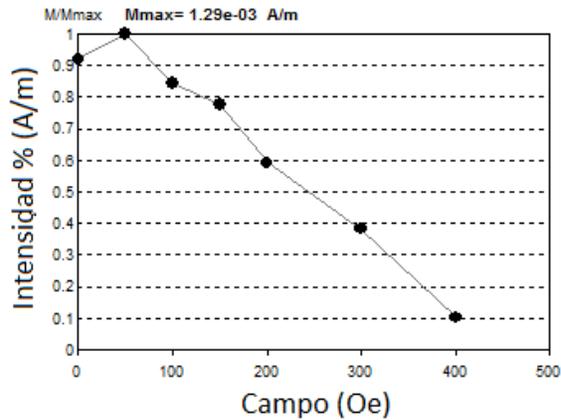
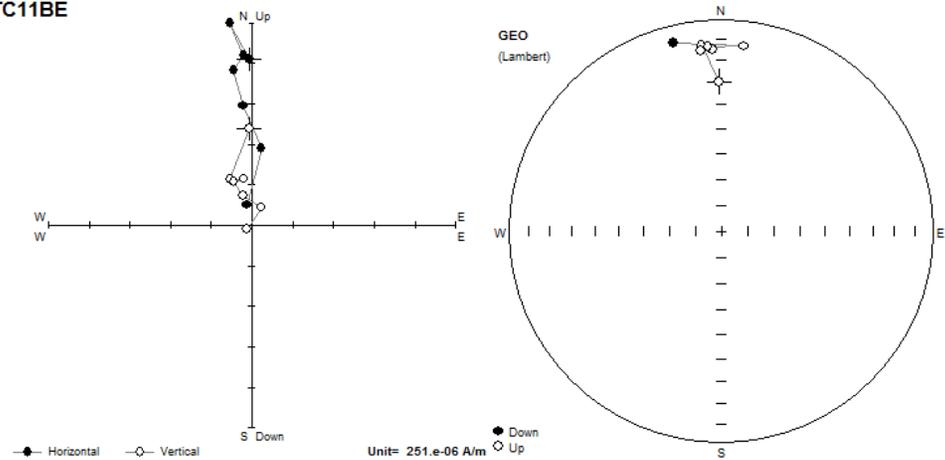
TC11BD



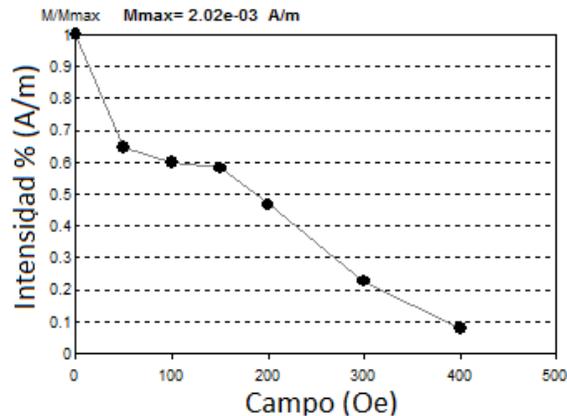
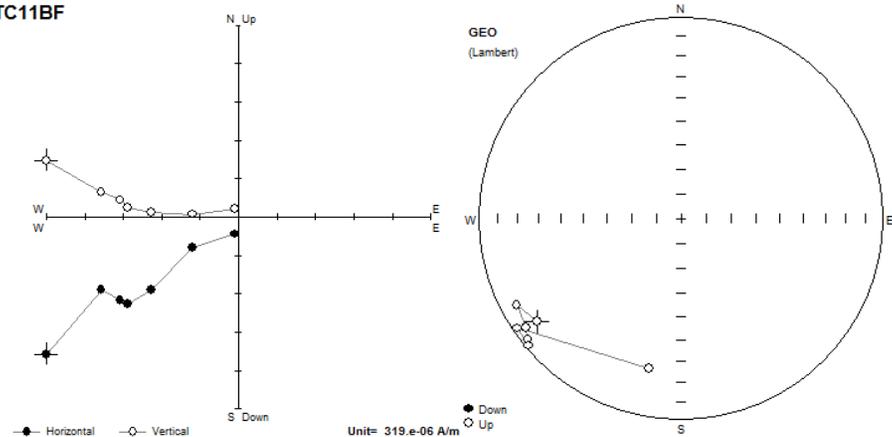
TC11BD



Para el espécimen D se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales.

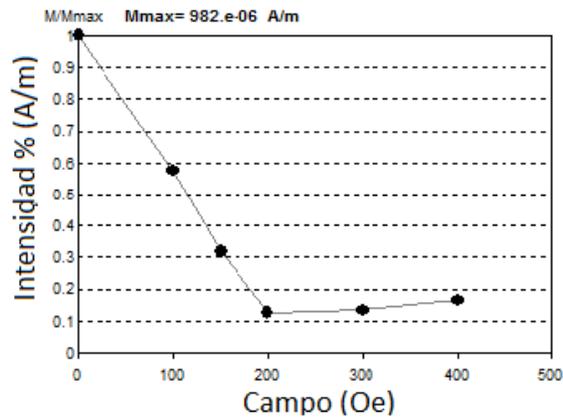
TC11BE**TC11BE**

Para el espécimen E se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones normales y reversas.

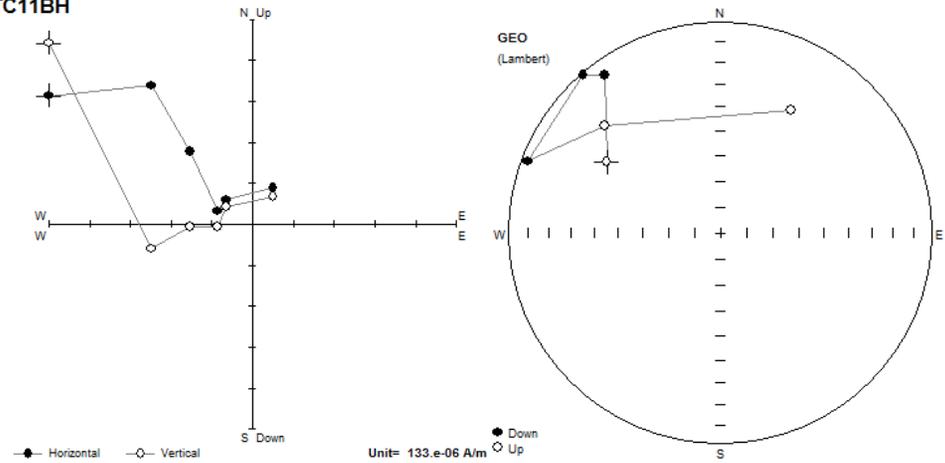
TC11BF**TC11BF**

Para el espécimen B se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe sin traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones reversas.

TC11BH

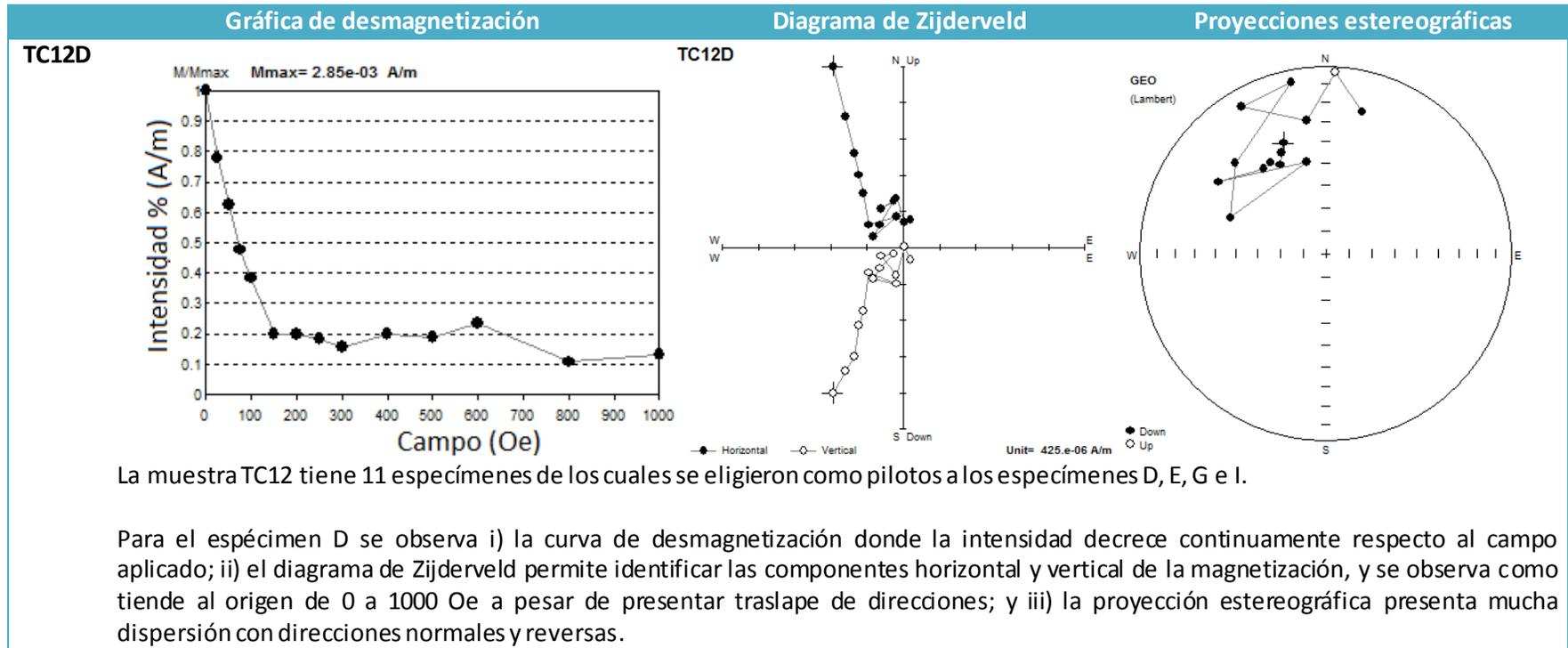


TC11BH

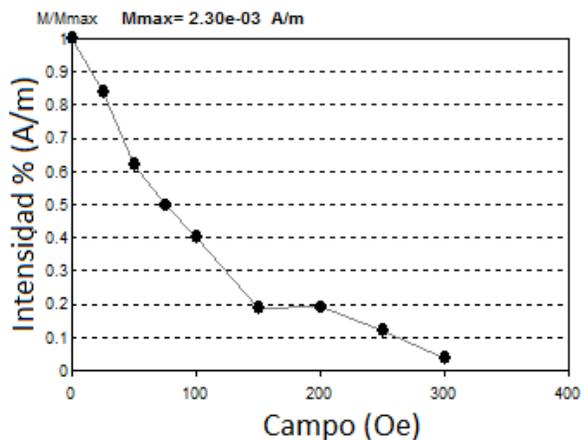


Para el espécimen H se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 400 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

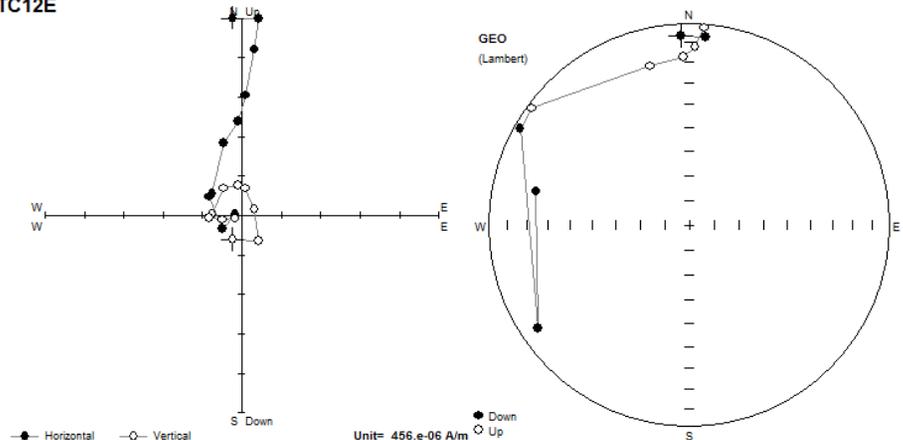
Tabla 12. Exhibe el lavado magnético de los especímenes piloto de la muestra TC12.



TC12E

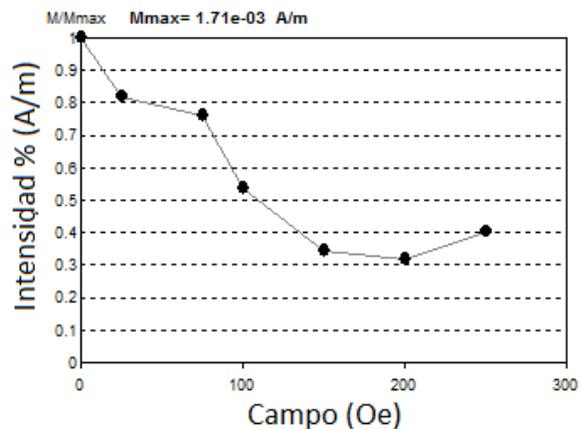


TC12E

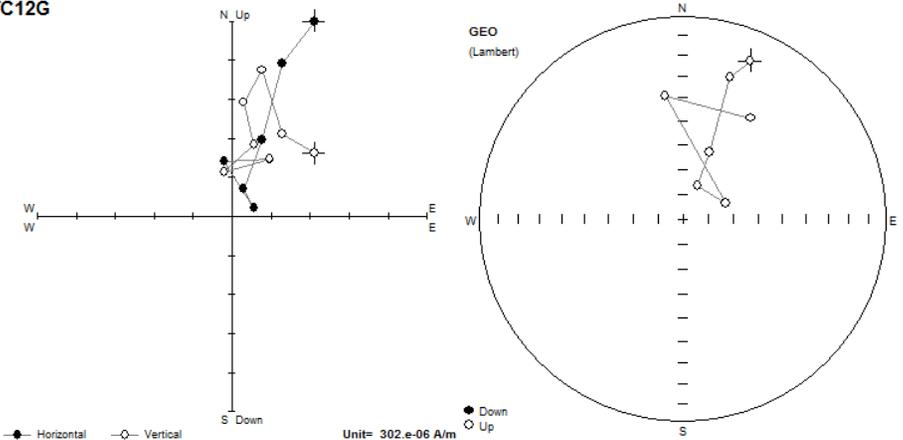


Para el espécimen E se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 300 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones normales y reversas.

TC12G

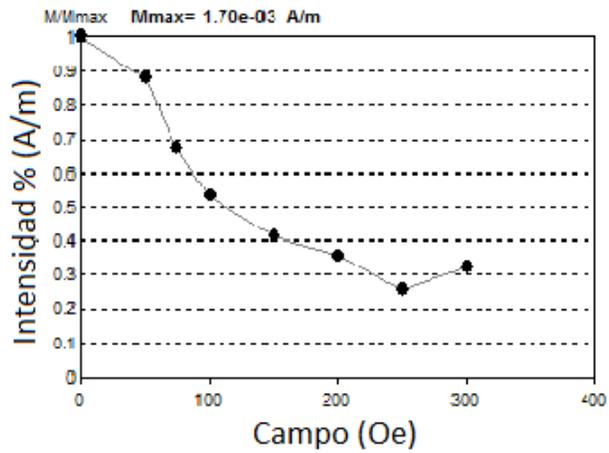


TC12G

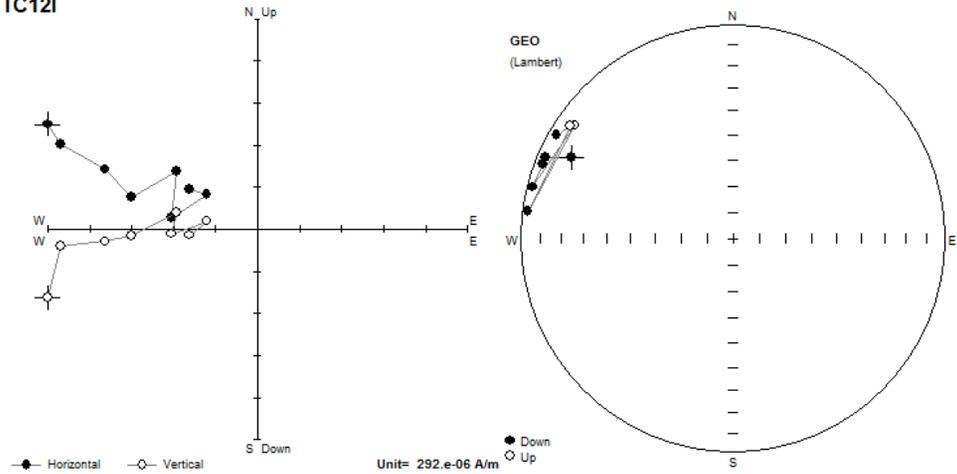


Para el espécimen G se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 250 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta mucha dispersión con direcciones reversas.

TC12I



TC12I

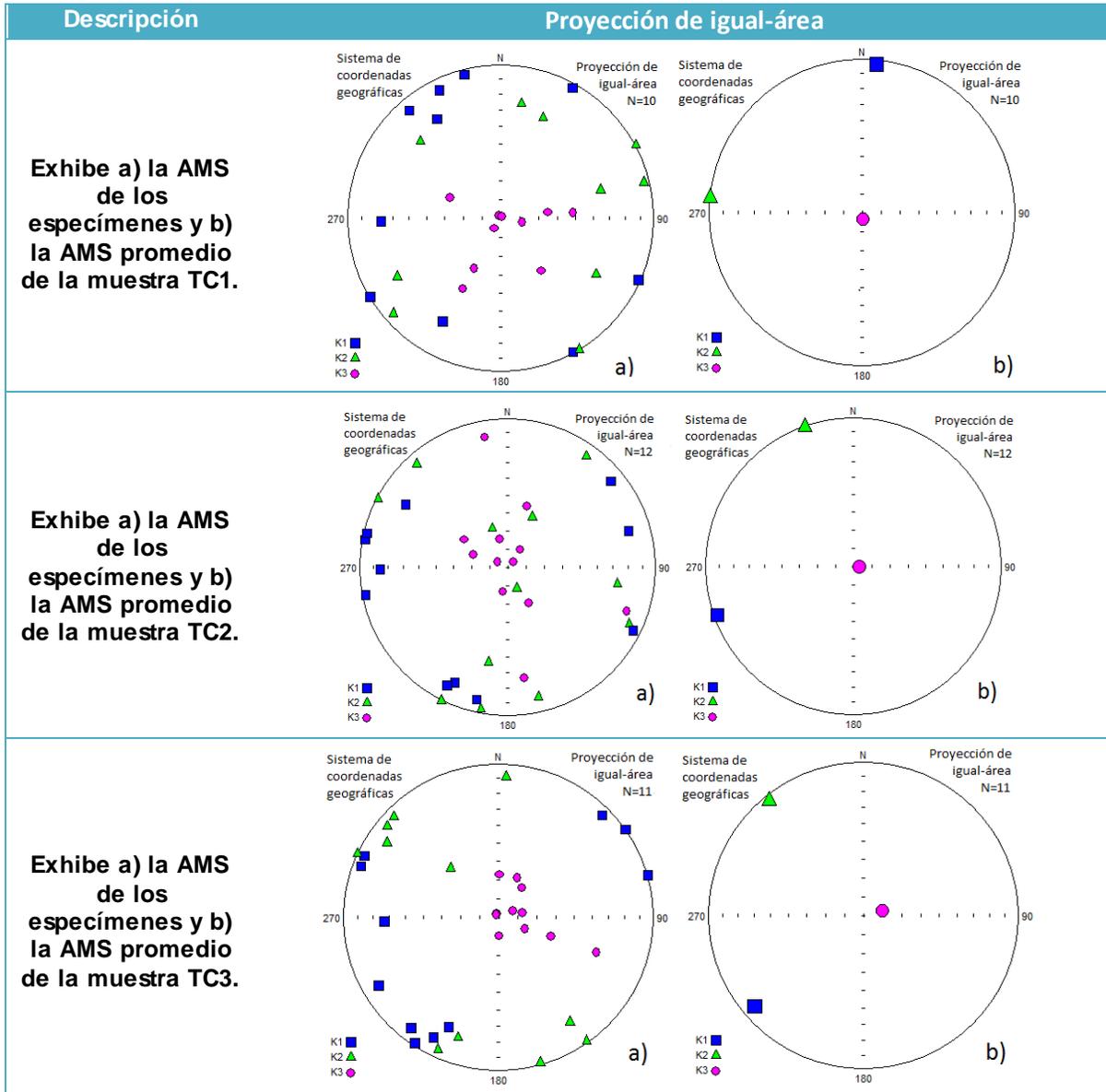


Para el espécimen I se observa i) la curva de desmagnetización donde la intensidad decrece continuamente respecto al campo aplicado; ii) el diagrama de Zijderveld permite identificar las componentes horizontal y vertical de la magnetización, y se observa como tiende al origen de 0 a 300 Oe a pesar de presentar traslape de direcciones; y iii) la proyección estereográfica presenta poca dispersión con direcciones reversas y normales.

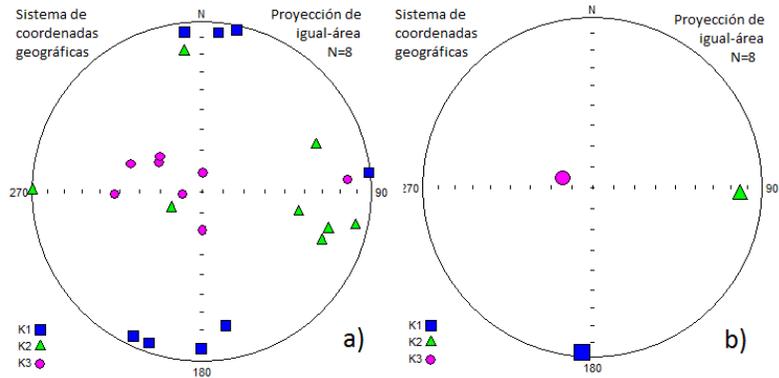
Anexo B. Resultados de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética.

Los resultados de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética para el sitio de Ndachjian Tehuacán se muestran a continuación.

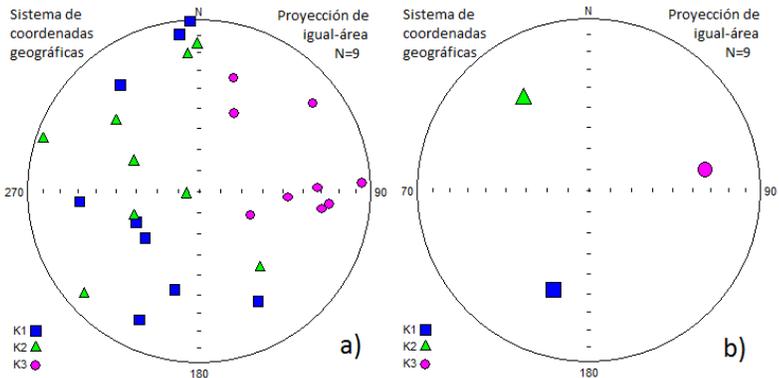
Tabla 13. Exhibe los resultados de AMS.



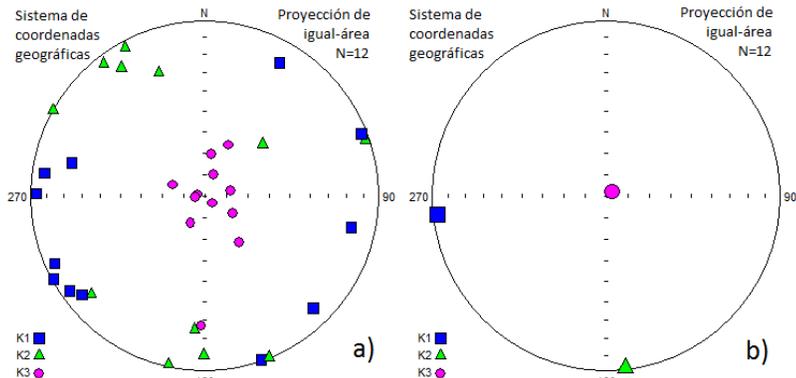
Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC4.



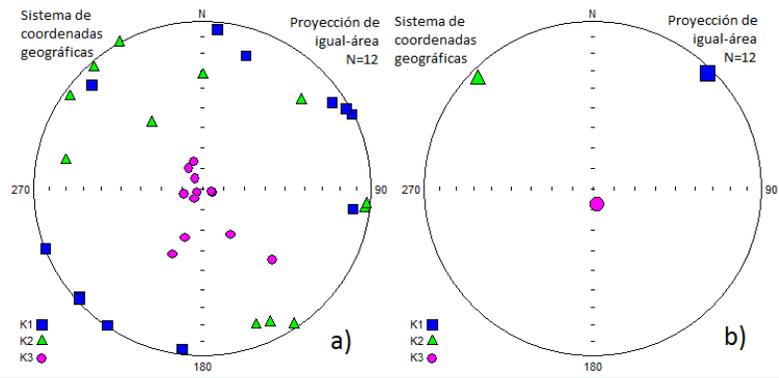
Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC5.



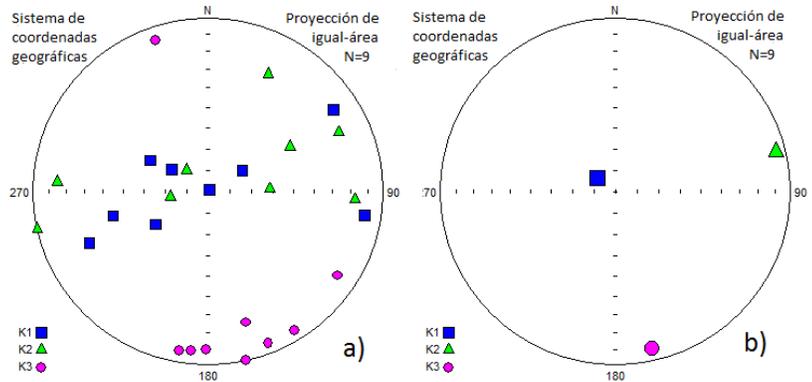
Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC6.



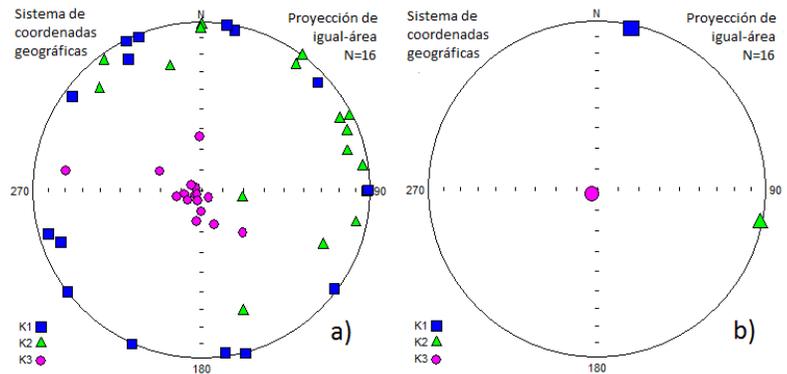
Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC7.



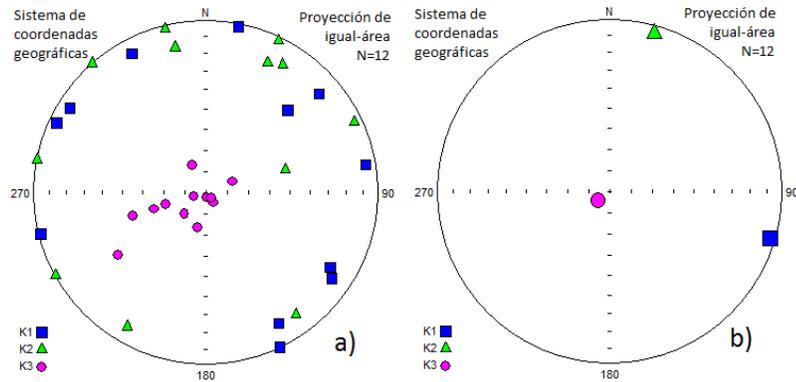
Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC8.



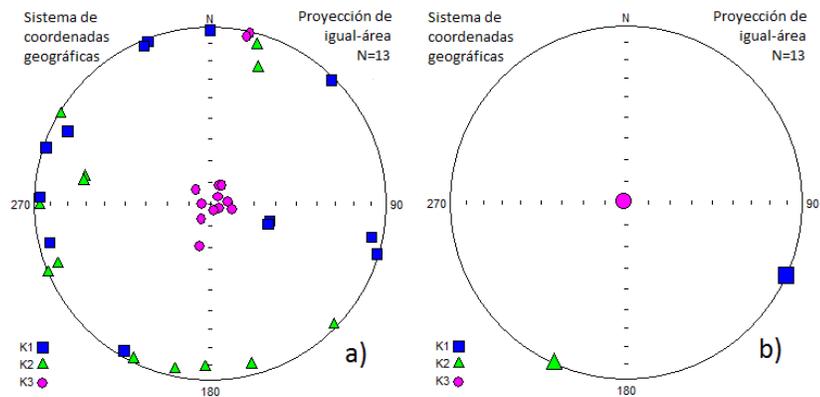
Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC9.



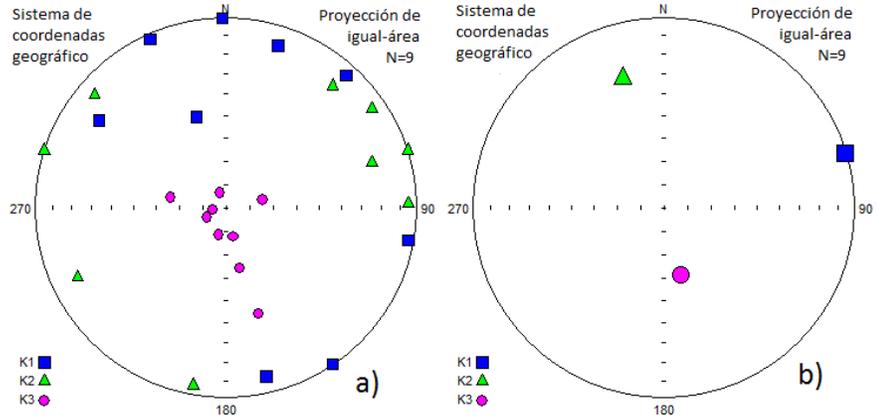
Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC10.



Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC11A.



Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC11B.



Exhibe a) la AMS de los especímenes y b) la AMS promedio de la muestra TC12.

