



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Variación secular del campo geomagnético
registrada en cerámicas del norte del estado de
Chihuahua.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

Mitsui Myrna Salgado Saito

TUTOR

Dr. Luis Manuel Alva Valdivia.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*El grado más alto del conocimiento
se alcanza con la superación del miedo.*
NIETZSCHE

Agradecimientos

Al proyecto del PAPIIT IN113117: Paleomagnetismo en rocas volcánicas y materiales arqueológicos del norte de México: variaciones temporales del campo geomagnético e implicaciones geodinámicas.

Al proyecto ANR-CONACyT (Francia-México) 273564: Acrónimo: Secular variation and paleointensity in México during the Plio-Quaternary. Por su financiamiento para el trabajo de campo y laboratorio.

Al doctor Luis Alva por su amabilidad y paciencia. A todos mis compañeros paleomagos que me enseñaron muchísimo y también a Victor y al Maestro Antonio que me enseñaron toda la parte del laboratorio.

A mis amigos de Facultad de Ciencias y a los de Ciencias de la Tierra que sin ellos la carrera no hubiese sido tan amena, y por todas las veces que nos quedamos hasta que nos corrieran de la biblioteca. A Dani que me ha acompañado en esta última etapa de la Tesis.

A toda mi familia, mis abuelos mis abuelitas, a mamá Pera que me cuidó y dio de comer hasta la Universidad, a mis tíos y tías en especial a mi tío Tazo, mi tía Hanako y a mi tía Eri. A mis primos, mis mejores amigos de la infancia.

A Mayush que es mi mejor amiga y mi compañerita.

Y sobre todo a mis papás que son mi ejemplo y las personas que más me apoyan en todos los momentos de mi vida, los quiero mucho.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Justificación del trabajo | 2 |
| 1.2. Hipótesis | 2 |
| 1.3. Objetivos | 2 |
| 2. Arqueología de Chihuahua | 4 |
| 2.1. Periodo pre-cerámico | 5 |
| 2.2. Periodo Cerámico | 5 |
| 2.2.1. Cerámicas Lisas | 6 |
| 2.2.2. Periodo Viejo | 6 |
| 2.2.3. Periodo Medio | 7 |
| 2.2.4. Periodo Tardío | 9 |
| 2.3. Las cerámicas de este estudio | 9 |
| 3. Magnetismo | 12 |
| 3.1. Campo magnético | 12 |
| 3.2. Momento magnético | 12 |
| 3.3. Susceptibilidad magnética | 13 |
| 3.4. Intensidad magnética o magnetización | 14 |
| 3.5. Relación entre B y H | 14 |
| 3.6. Campo magnético Terrestre | 14 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.6.1. | Variación secular geomagnética | 16 |
| 3.7. | Magnetismo de Rocas | 16 |
| 3.7.1. | Dominios magnéticos | 17 |
| 3.7.2. | Magnetización a nivel atómico | 18 |
| 3.7.3. | Temperatura de Curie y Temperatura de Néel | 21 |
| 3.7.4. | Magnetización Remanente Natural | 22 |
| 3.7.5. | Minerales Magnéticos | 25 |
| 3.8. | Pruebas de propiedades magnéticas | 27 |
| 3.8.1. | Susceptibilidad vs. Temperatura | 27 |
| 3.8.2. | Desmagnetización térmica | 28 |
| 3.8.3. | Ciclo de Histéresis | 29 |
| 3.9. | Arqueointensidad absoluta | 31 |
| 3.10. | Datación Arqueomagnética | 35 |
| 4. | Metodología | 37 |
| 4.1. | Etapa 1. Preparación de las muestras | 38 |
| 4.2. | Etapa 2. Selección de las muestras | 39 |
| 4.2.1. | Experimentos de susceptibilidad magnética contra temperatura | 40 |
| 4.2.2. | Desmagnetización térmica y diagramas Vectoriales | 40 |
| 4.2.3. | Histéresis magnética | 40 |
| 4.3. | Etapa 3. Cálculo de la arqueointensidad | 41 |
| 5. | Resultados | 43 |
| 5.1. | Propiedades magnéticas para la selección de las cerámicas aptas | 43 |
| 5.1.1. | Curvas de k vs. T | 43 |
| 5.1.2. | Diagramas Vectoriales | 47 |
| 5.1.3. | Histéresis y Diagrama de DAY | 52 |
| 5.2. | Arqueointensidad | 53 |
| 6. | Discusión | 58 |

Resumen

En este trabajo se presentan resultados de arqueointensidad de dos tipos cerámicos Mimbres y Ramos, cronológicamente diferentes. Encontrados en los sitios arqueológicos de Galeana, Villa Ahumada, Mimbres, CH331 y CH3A localizados en el Norte del Estado de Chihuahua, México.

Se analizaron 40 muestras y se seleccionaron 25 para el cálculo de arqueointensidad. Se utilizó el método de Thellier-Thellier modificado por Coe en 1967. En total se lograron 9 resultados satisfactorios según los coeficientes de calidad de Coe: 5 de Mimbres y 4 de Ramos.

En el caso de Mimbres se obtuvieron 2 valores de intensidad. El grupo 1 obtuvo una intensidad promedio de $40.77 \pm 12 \mu T$ y el grupo 2 de $56.67 \pm 0.58 \mu T$. El VADM del promedio 1 es de $7.95 \pm 1.16 \times 10^{22}$ y el del promedio 2 es de $10.93 \pm 1.15 \times 10^{22}$. Los valores de Intensidad de Mimbres no coincidieron con su contexto arqueológico según los intervalos de edades calculados con el Software de Matlab de Pavón y Carrasco (2011). Además los VADM coinciden poco con los datos de GEOMAGIA.

En el caso de las cerámicas Ramos se obtuvieron dos intensidades, la de Galeana resultó de $54.80 \pm 0.34 \mu T$ y la de Villa Ahumada de $45.94 \pm 0.98 \mu T$. El resultado de Galeana coincidió tanto con su contexto arqueológico como con los datos de Nuevo México tomados de la base de datos de Geomagia.

Capítulo 1

Introducción

Muchos materiales arqueológicos contienen minerales magnéticos que adquieren un registro del campo geomagnético del momento en que se formó el material. Puesto que el campo geomagnético cambia tanto su dirección como su intensidad en el tiempo y en el espacio, el momento de adquisición de la remanencia del material nos puede ofrecer información del campo geomagnético de ese momento. Además que conocer los parámetros del campo magnético en diferentes temporalidades y localidades nos permite definir y entender la estructura global del campo geomagnético (Butler 1998).

El arqueomagnetismo estudia materiales arqueológicos que registraron el campo geomagnético en el momento de su último calentamiento. Esta rama del paleomagnetismo es muy importante ya que nos permite crear curvas de variación temporal de los parámetros geomagnéticos que eventualmente nos permitirán datar materiales arqueológicos con precisión.

En México los estudios arqueomagnéticos empiezan con los estudios de Nagata en 1965 y Wolfman en 1973. Los datos de Wolfman se han re trabajado por diferentes investigadores para construir las únicas tres curvas de variación de México: Wolfman (1990), Böhnelt y Molina (2002, re trabajo de datos de Wolfman, 1990), Soler y colaboradores (2006, datos de Wolfman, geológicos) (Soler 2014). Sin embargo, la región Norte del país no ha sido arqueomagnéticamente estudiada.

1.1. Justificación del trabajo

El arqueomagnetismo es una herramienta que nos da información confiable del campo magnético en diversas temporalidades. Con esta información se construyen curvas de variación secular (CVS), las cuales son fundamentales para entender el comportamiento del campo magnético de la Tierra y sus cambios. Además estas curvas se pueden utilizar para hacer dataciones relativas de los materiales en estudio.

La precisión de una datación arqueomagnética depende directamente de la calidad de las curvas de variación secular, y esta calidad se mejora agregando datos de dirección o intensidad de buena calidad sin embargo las curvas de variación secular de mejor calidad se concentran en Europa. En México aún con la gran riqueza arqueológica, hay pocos trabajos de arqueomagnetismo, que además se concentran en la zona de Mesoamérica, dejando a un lado la parte Arqueológica del norte o Aridoamérica. Este trabajo es la primer aportación arqueomagnética del Norte del país, determinando arqueointensidades de cerámicas de Chihuahua con temporalidades aproximadas desde 1000 a 1450 años d.C.

1.2. Hipótesis

Comúnmente las cerámicas están hechas de distintas mezclas de materiales donde se incluyen minerales magnéticos, estos son capaces de registrar la intensidad del campo geomagnético del momento en que se calentaron por última vez, y esta se puede calcular posteriormente en el laboratorio. Además por la comparación con una curva maestra regional de variación secular se puede determinar una edad aproximada.

1.3. Objetivos

Calcular las arqueointensidades del campo geomagnético registradas en cerámicas del Norte del estado de Chihuahua utilizando dos tipos de cerámicas con dos fechas arqueológicas diferentes, y así aportar datos para una curva de variación del Norte de México. Además comparar

las arqueointensidades calculadas con las curvas Maestra de Variación secular para datación arqueomagnética.

Capítulo 2

Arqueología de Chihuahua

Chihuahua con una superficie de 257460 km², es el estado más extenso de los Estados Unidos Mexicanos y limita con los estados de Nuevo México y Texas de los Estados Unidos de América; dentro del país al oeste, con Sonora y Sinaloa; al sur, con el de Durango; y al este con Coahuila.

Arqueológicamente, Chihuahua es un estado con gran riqueza ya que contiene una de las culturas más conocidas e interesantes del Noroeste de México: Casas Grandes, famosa sobre todo por Paquimé, el sitio arqueológico principal de la cultura, y su cerámica Polícroma. La cultura Casas Grandes forma parte de la Cultura Mogollón que se extiende desde los Desiertos de Nuevo México, Chihuahua, y alcanza el oeste de Texas (figura 2-1).

Hubo varios estudios previos en la zona de Casas Grandes, pero no fue hasta que Charles Di Peso empezó un estudio intensivo y riguroso en donde se excavaron distintos sitios que permitieron la recolección de una gran cantidad de cerámica, conchas y materiales de origen orgánico con los cuales se estableció una cronología de la zona. En esta se identifican dos ramas culturales importantes, pre-cerámica y cerámica Di Peso (1974), y puesto que el objeto principal en este trabajo es la cerámica, se abordará la segunda fase con mayor profundidad.



Figura 2-1: Región Cultural Mogollón.

2.1. Periodo pre-cerámico

El periodo pre-cerámico es un periodo muy amplio que comienza desde hace unos 9,000 años a.C cuando sus habitantes eran solo recolectores cazadores en el Paleoceno. Este periodo llamado Paleoindio se caracteriza sobre todo por sus puntas acanaladas Folsom y Clovis las cuales se han encontrado en Chihuahua (Di Peso 1965). Después del periodo Paleoindio comienza el periodo Arcaico (9000 a.C-0) donde al principio se caracteriza por una vida seminómada pero en su etapa tardía empieza a haber una agricultura temprana, se distingue un sistema de vida con una gran relación con la naturaleza y su medio ambiente.

2.2. Periodo Cerámico

La primer cronología de la cultura de Casas Grandes en el periodo cerámico distingue 4 etapas principales: Cerámicas Lisas, Periodo Viejo, Medio, y Tardío.

2.2.1. Cerámicas Lisas

Este periodo se desarrolla del año 1 al 700 d.C. y es en él que aparecen las primeras tradiciones cerámicas las cuales no tenían decoración y eran de color café y rojo, se encuentran cajetes, jarros y pipas. Las construcciones de este periodo eran semisubterráneas y circulares Di Peso reconoce este como uno de los períodos menos conocidos.

2.2.2. Periodo Viejo

Este periodo se ubica entre los años 700-1060 d.C., se funda la ciudad de Paquimé y también surgen otros asentamientos en Cuevas aledañas (figura 2-2). La primera edad de Paquimé fue estimada por una tendencia promedio de edades de radiocarbono del sitio Convento y fechas de dendrocronología de Paquimé y cerámica del tipo Mimbres Negro sobre blanco (Di Peso, 1974).

Basado en arquitectura y estratigrafía del sitio Convento Di Peso (1974) divide este período en tres fases:

1. Fase Convento (700-900 d.C.) Llamada así a partir de unas ruinas encontradas en Misión de San Antonio de Padua, donde se muestran conjuntos de casas habitación alrededor de una estructura comunitaria de mayor tamaño. Este tipo de conjuntos son característicos de esta fase, donde las casas fueron construidas mediante la excavación previa de un agujero circular de una profundidad menor de un metro. Estas casas estaban cercadas por ramas, que delimitaban y aislaban la villa. La cerámica característica es rojo sobre café.

2. Fase Pílon (900-950 d.C.) En esta fase la arquitectura es muy parecida a la fase anterior, las casas siguen siendo semi subterráneas, pero al haber un incremento en la población (estimado gracias al número de entierros que se han encontrado) los conjuntos se hicieron de mayor extensión y el cercado de ramas desapareció (Di peso 1974).

3. Fase Perros Bravos (950-1060 d.C.) Esta es la fase final del periodo Viejo, aquí ocurrieron muchos cambios culturales y arquitectónicos. En esta fase las viviendas ya son superficiales y más grandes, además agrupadas y conectadas formando una plaza. Las cerámicas, tienen

diversas texturas y pinturas, pero en general la cerámica del periodo viejo no es tan variada y es de uso más doméstico. Esta fase muestra evidencia de intercambio a larga distancia, tanto de cerámica como de conchas. Hay un notable intercambio con culturas del centro y norte de México, así como también con el Suroeste de los Estados Unidos, ya que aparecen muchas conchas y cuentas de turquesa. También se encuentran por primera vez piezas de cobre.



Figura 2-2: Evolución de la Arquitectura de Casas Grandes en el periodo Viejo. (Modificado de Cornejo Brannif, 2016)

2.2.3. Periodo Medio

El periodo Medio (1200-1450 años d.C.) es la etapa donde floreció la cultura Casas Grandes en todos los aspectos. Se caracteriza principalmente por la construcción de Paquimé (figura 2-3), donde hay un crecimiento de población y un desarrollo económico, político, social y cultural. En cuanto al comercio, se generan diversas rutas, las cuales se identifican por los diversos tipos cerámicos encontrados, por las toneladas de conchas, el cobre, la turquesa y otros minerales. Los moluscos encontrados en Paquimé son procedentes de las costas del Pacífico, la turquesa es traída desde las minas de Nuevo México. También había comercio de aves, como guacamayas, halcón gris, correcaminos y diversas especies de Guajolotes. El cobre creó una ruta que unió a Paquimé con otros sitios como Tenochtitlan, Chichén Itzá y Guatemala.

La arquitectura en el Periodo Medio alcanzó una eficiencia que no se compara con la del periodo Viejo, (donde las construcciones eran semi subterráneas), ahora las construcciones son de diversas plantas y están construidas esencialmente de barro pero también con madera, la cual servía como columnas y vigas que soportaban pisos superiores. Además se construyeron



Figura 2-3: Zona arqueológica Paquimé.

edificaciones de carácter religioso, juegos de pelota y un sistema completo de obtención y distribución de agua. Las Guacamayas juegan un papel significativo, tanto económico como religioso, se han encontrado restos de guacamayas relacionados a sacrificios y se encuentran también en diversos diseños cerámicos.

La cerámica polícroma en distintos tipos es probablemente el rasgo más reconocible del periodo Medio en la región de Casas Grandes. Es notable la producción de una variedad de formas excéntricas como formas humanas y de animales. Las técnicas de fabricación se vuelven más sofisticadas, textura más fina, y una forma más simétrica. Además surgieron diferentes tipos de cerámica polícroma.

Di Peso (1974) divide este periodo en tres fases, Fase Buena Fé, Paquimé y Diablos. En la fase Buena Fé es donde empieza la construcción de la ciudad de Paquimé. La fase Paquimé es la fase donde Casas Grandes prospera y alcanza su máximo esplendor, en el cual se forma todo el conjunto habitacional, se crea un servicio de abastecimiento de agua, se incrementa su producción para la alimentación de sus habitantes y finalmente en la fase Diablo empieza el deterioro de Paquimé.

2.2.4. Periodo Tardío

Este periodo marca la desintegración de Paquimé, se detiene la construcción civil y se suspende el mantenimiento de la ciudad. Continuó la producción de objetos pero solo para uso personal y hubo un gran aislamiento (Di Peso 1974).



Figura 2-4: Ejemplos de Cerámica Mimbres a la derecha (Tomada de Department of American Decorative Arts and Sculpture) y Ramos a la Izquierda.

2.3. Las cerámicas de este estudio

La cerámica de la cultura Casas Grandes, es probablemente uno de los componentes mas importantes y reconocidos de esta cultura. Casas Grandes además siempre tuvo una relación con sus vecinos Mogollones, los cuales también introdujeron diferentes tipos cerámicos.

En este trabajo se utilizaron dos tipos cerámicos diferentes: Mimbres y Ramos Polícromo (figura 2-4).

La cultura Mimbres está conformada por una serie de cuartos de adobe construidos en el valle de Mimbres al suroeste de Nuevo México pero también hay asentamientos en Arizona y al Norte de México (Hegmon, 1998), esta cultura es parte del gran conjunto cultural llamado Mogollón del cual también forma parte la cultura Casas Grandes (figura 2-5). Su cerámica es también muy característica por sus diseños muy detallados, únicos en el Suroeste de los Estados Unidos. Su distribución se concentra en el Sur de Nuevo México, el Paso Texas hasta

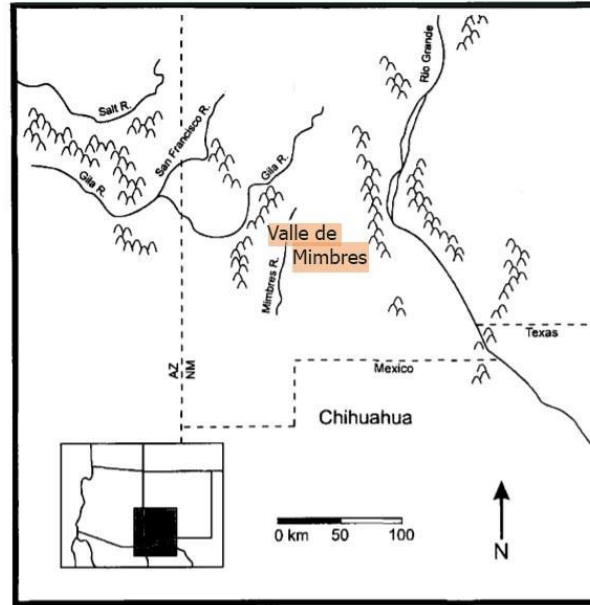


Figura 2-5: Valle de Mimbres (Imagen modificada de Nelson 2001).

Chihuahua. La cerámica Mimbres se conoce por ser blanca con motivos pintados en negro, pero en realidad suele ser un poco grisácea-café pintada de blanco y sobre esta se dibujaban los motivos. Generalmente son jarrones con dibujos de animales como aves y peces, personas y diversos símbolos y figuras geométricas. El nombre de esta cultura y de la cerámica característica se debe a un río llamado Mimbres al Suroeste de Nuevo México sin embargo no se sabe mucho de esta cultura, ni como se nombraban a sí mismos.

La región Mimbres es relativamente cercana a la región ocupada por Casas Grandes por lo tanto la relación entre sus fechas y etapas es cercana, así mismo su arquitectura, y sus similitudes cerámicas nos hablan de una fuerte interacción. El apogeo de la cerámica Mimbres está entre los 1000 y 1150 años d.C.

La cerámica tipo Ramos Polícromo es propia de la Cultura Casas Grandes. Esta Cerámica se caracteriza por un fondo crema o anaranjado con decoraciones en pintura rojo y negro, hay formas muy excéntricas de cerámicas, con botellas en forma desde animales y humanos. También tienen diferentes diseños, de animales hasta de los habitantes de Paquimé y sus actividades rituales. La cerámica Ramos Polícromo es típica del periodo Medio de Paquimé que

está ubicado entre los años 1250 y 1450 d.C.

Capítulo 3

Magnetismo

Para empezar a entender el Archeomagnetismo es necesario entender algunas definiciones básicas.

3.1. Campo magnético

Un campo magnético es un campo vectorial es decir una región que asocia un vector a cada punto del espacio. Generalmente se usa el símbolo \mathbf{B} para representar al campo magnético y lo podemos describir de una manera sencilla conociendo la fuerza de Lorentz la cual está definida como:

$$F = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Donde \mathbf{F} es la fuerza magnética, \mathbf{v} es la velocidad y \mathbf{B} el campo magnético.

3.2. Momento magnético

Para definir el momento magnético es necesario conocer la ley de Ampere la cual relaciona un campo magnético estático con una corriente eléctrica estacionaria y su forma integral es:

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc}$$

Donde:

- B : campo magnético
- dl : segmento infinitesimal del trayecto de integración
- μ_0 : permeabilidad del espacio libre
- I_{enc} : corriente encerrada por el trayecto

Si examinamos el campo magnético generado por una corriente circulando por una espira en un punto que está dado por la ecuación:

$$B = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

Si estamos lejos de la espira ($z \gg R$) esta ecuación se puede expresar así:

$$B = \frac{\mu_0 i R^2}{2z^3}$$

La expresión $i\pi R^2$ en la ecuación puede escribirse como iA donde $A = \pi R^2$ es el área del espira circular. Con esto establecido se define como momento dipolar μ a:

$$\mu = iA$$

El momento magnético es una de las definiciones mas importantes ya que nos explica el par y la fuerza que puede ejercerse tanto en una corriente, como en un electrón al aplicarse un campo externo.

3.3. Susceptibilidad magnética

Básicamente la susceptibilidad magnética se puede definir como una medida cuantitativa de que tanto puede magnetizarse un material relacionando M con un determinado campo magnético aplicado H (Tauxe 2010).

$$\mathbf{M} = \chi_v \mathbf{H}$$

Donde la v denota volumen. Como M y H tienen las mismas unidades que son Am^{-1} la susceptibilidad resulta ser adimensional.

3.4. Intensidad magnética o magnetización

La intensidad magnética de un material es el momento magnético neto es decir la suma vectorial de todos los dipolos por unidad de volumen:

$$J = \frac{\sum_i M_i}{v}$$

3.5. Relación entre B y H

B y H son cantidades vectoriales las cuales están muy relacionadas, en la práctica paleomagnética ambas letras se refieren a campo magnético, pero estrictamente hablando B se refiere a la inducción y H es el campo. La relación entre los dos está dada por:

$$\mathbf{B} = \mu(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

donde μ es la permeabilidad del espacio.

3.6. Campo magnético Terrestre

Nuestro planeta tiene un campo magnético, que se extiende desde el núcleo de la Tierra hasta que se encuentra con el campo magnético interplanetario (CMI). Su origen es un misterio hasta el día de hoy. Se han propuesto muchas teorías y una de las más conocidas y aceptadas es la que dice que el campo geomagnético se forma gracias al núcleo externo líquido de la Tierra el cual actúa como un dínamo magnetohidrodinámico principalmente a la rotación de la Tierra.

El campo geomagnético está conformado por vectores que tienen una dirección y una magnitud. En paleomagnetismo cualquier vector del campo geomagnético en la superficie de la Tierra se define según las siguientes relaciones:

$$\mathbf{H}_v = \mathbf{H} \sin I$$

\mathbf{H}_v es la componente horizontal de \mathbf{H} e I es la inclinación de \mathbf{H} que va de -90° hasta 90° y es definida positivamente hacia abajo. La componente horizontal, H_h está dada por:

$$\mathbf{H}_h = \mathbf{H} \cos I$$

Las componentes geográficas norte y este son:

$$\mathbf{H}_N = \mathbf{H} \cos I \cos D$$

$$\mathbf{H}_E = \mathbf{H} \cos I \sin D$$

Donde D se define como declinación y es el ángulo que forma la componente horizontal con el norte geográfico y va de 0° a 360° positivo en dirección a las manecillas del reloj (figura 3-1).

Al conocer I y D podemos describir completamente el campo geomagnético.

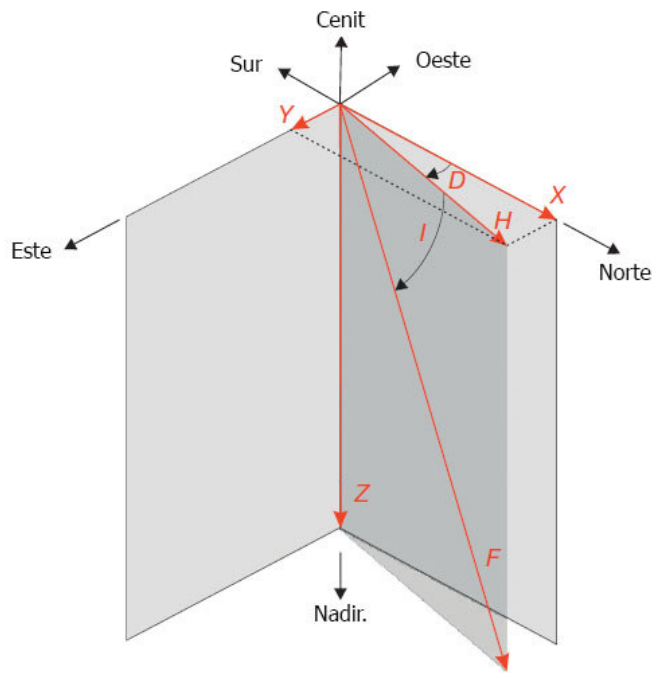


Figura 3-1: Componentes del Vector del campo Geomagnético.

Si conocemos las componentes del vector podemos calcular la intensidad del campo magnético que está dada por:

$$\mathbf{H} = \sqrt{\mathbf{H}_n^2 + \mathbf{H}_e^2 + \mathbf{H}_v^2}$$

El campo geomagnético es algo muy difícil de modelar por lo tanto en estudios paleomagnéticos el modelo que se utiliza es el Modelo del dipolo geocéntrico axial (GAD), en el cual los ejes geográficos y geomagnéticos coinciden.

Al analizar el campo geomagnético actual podemos ver muchas similitudes con el GAD. Sin embargo también hay grandes diferencias, por ejemplo el polo norte y el polo sur geográfico son diferentes al polo norte y al sur magnético, así como también el ecuador magnético no encaja perfectamente sobre el ecuador geográfico. Esto nos demuestra que el modelo GAD no es suficiente para poder describir el campo magnético actual. Un modelo que podría describir de mejor manera sería el del Dipolo geocéntrico inclinado, el cual nos muestra un dipolo magnético inclinado $\sim 11.5^\circ$ del eje de rotación, pero aún así el campo magnético no se explica totalmente y solo nos explica un $\sim 90\%$ del campo magnético dipolar siendo el otro $\sim 10\%$ una porción significativa llamada campo no dipolar (Butler, 1998).

3.6.1. Variación secular geomagnética

Básicamente el paleomagnetismo existe gracias a la remanencia magnética y por la variación secular geomagnética, es decir que la dirección y la magnitud del campo geomagnético cambia en el tiempo. La variación secular tiene dos contribuciones:

- 1) Cambios no dipolares, los cuales dominan los cambios de periodo corto e históricamente se ha observado una deriva del campo no dipolar hacia el oeste, aproximadamente 4° al año.
- 2) Cambios dipolares, ($\sim 90\%$ del campo magnético en la superficie), los cuales se relacionan con periodos largos y cambios de polaridad del campo geomagnético (figura 3-2).

3.7. Magnetismo de Rocas

Toda la materia es magnética pero en el campo de la geofísica usualmente nos interesan los minerales capaces de guardar la información magnética, esto es guardar una remanencia, estos son los minerales: ferromagnéticos, ferrimagnéticos y antiferrimagnéticos. En este apartado se hablará de los distintos materiales y de cómo guardan su remanencia.

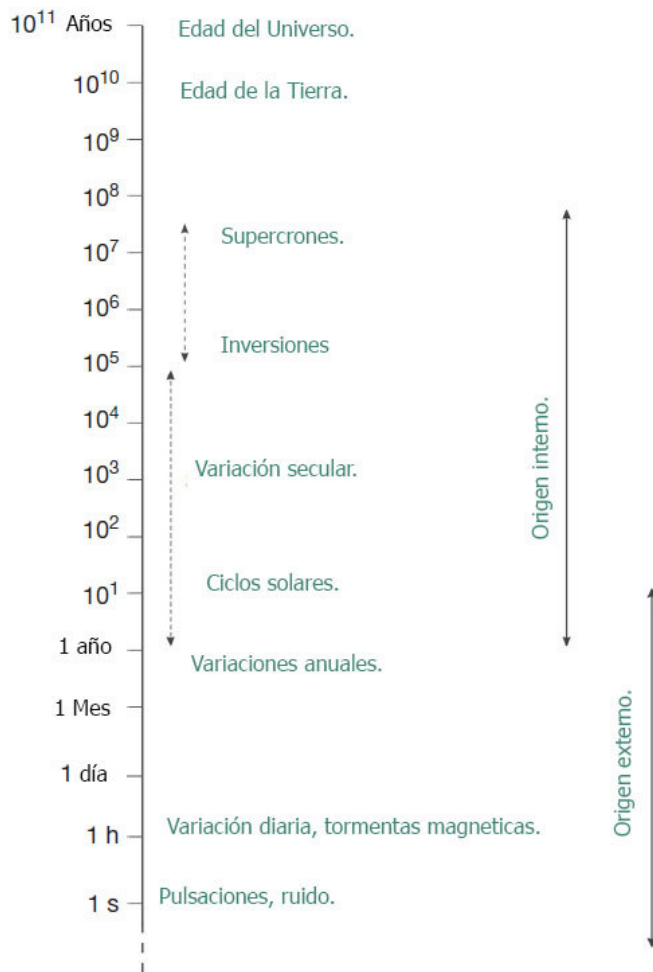


Figura 3-2: Variaciones del campo magnético.

3.7.1. Dominios magnéticos

Los dominios magnéticos son pequeñas regiones de volumen del material dentro de los cuales se cumple que todos los momentos magnéticos se encuentran alineados en la misma dirección. Los límites entre los dos dominios se llaman paredes de Bloch y teóricamente miden aproximadamente $.1\mu m$ (Tarling, 1983) (figura 3-3).

Con la disminución del tamaño del grano magnético, el número de dominios disminuye, eventualmente si el grano es demasiado pequeño, es energéticamente no favorable formar una pared de bloqueo para subdividir el grano y formar mas dominios, estos granos que solo

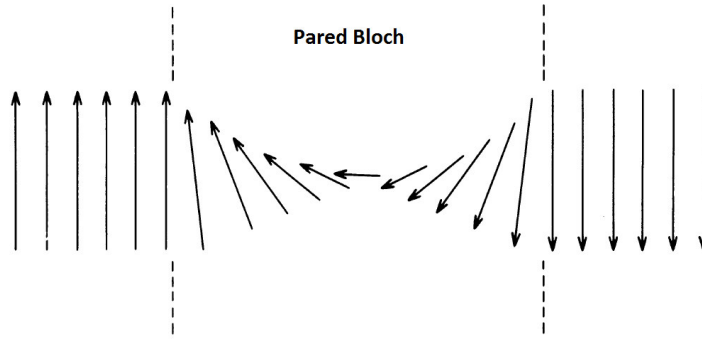


Figura 3-3: Pared bloch (Imagen tomada de Tarling 1983).

contienen un dominio se denominan de dominio sencillo o SD, en cambio los granos MD o multidominio son granos que tienen más de un dominio magnético.

No hay un límite claro entre granos SD y MD, en lugar de eso los granos con valores intermedios de J_r/J_s y H_c (fuerza de coercitividad) se denominan de Pseudo dominio sencillo (PSD).

3.7.2. Magnetización a nivel atómico

Para entender cómo se magnetizan los materiales es importante introducir el concepto del espín.

Un espín es un parámetro cuántico que tienen los electrones es decir es un parámetro que no podemos explicar ni visualizar con la mecánica clásica, pero intuitivamente lo podemos explicar como una rotación de un electrón alrededor de un eje. Cargas eléctricas en movimiento generan campos magnéticos y a nivel atómico, los movimientos de los espines de los electrones también lo generan. Este campo magnético que se forma dentro del electrón es puramente dipolar, por lo tanto podemos imaginar el espín como una barra magnética con su norte y su sur coincidiendo con el eje de rotación de este (figura 3-4).

Según los momentos dipolares de los átomos y sus interacciones entre estos los materiales se pueden clasificar como:

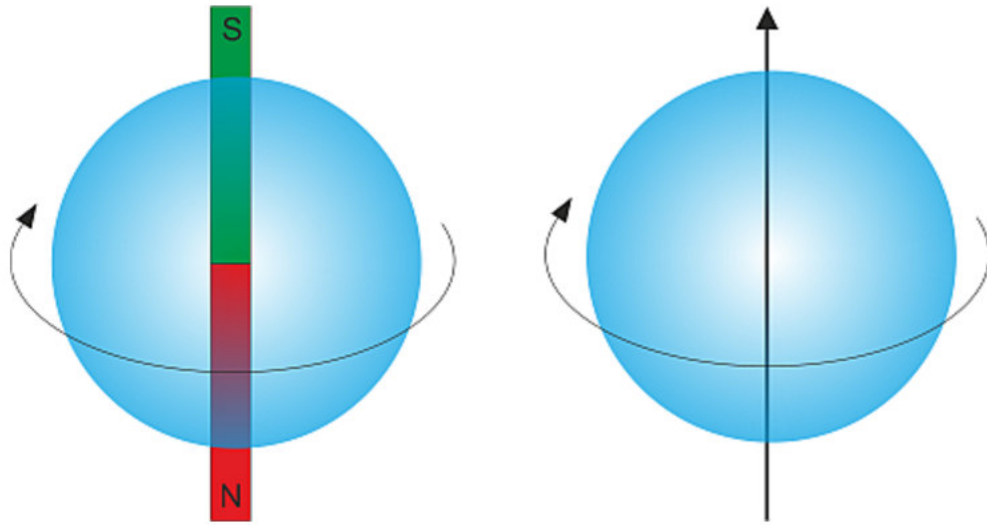


Figura 3-4: Interpretación intuitiva de un espín.

Diamagnéticos.

El diamagnetismo es un efecto que se observa en todos los materiales, pero generalmente es un efecto mucho más débil que el paramagnetismo. Resulta cuando se aplica un campo magnético y hay una adquisición de una magnetización inducida J_i . Pero esta es opuesta al campo magnético aplicado H . La magnetización en estos materiales depende linealmente del campo aplicado y se reduce a cero al removerle el campo.

La susceptibilidad magnética χ de un material diamagnético es negativa e independiente de la temperatura (Butler, 1998). Ejemplos de minerales diamagnéticos serían el cuarzo, el yeso o el grafito.

Paramagnéticos.

Los materiales paramagnéticos contienen átomos con momentos magnéticos que adquieren una magnetización J_i paralela al campo aplicado H y son linealmente dependientes, es decir la suma vectorial de los momentos dipolares individuales es diferente de cero. En ausencia de un campo magnético, sus momentos magnéticos están distribuidos de forma aleatoria en todas

direcciones con una magnetización resultante $J_r = 0$

La susceptibilidad magnética χ de un material paramagnético es positiva pero con valores muy bajos, su magnetización además es dependiente del campo \mathbf{H} (Butler, 1998). Algunos minerales paramagnéticos son el olivino, piroxeno, anfíbol, granate y biotita.

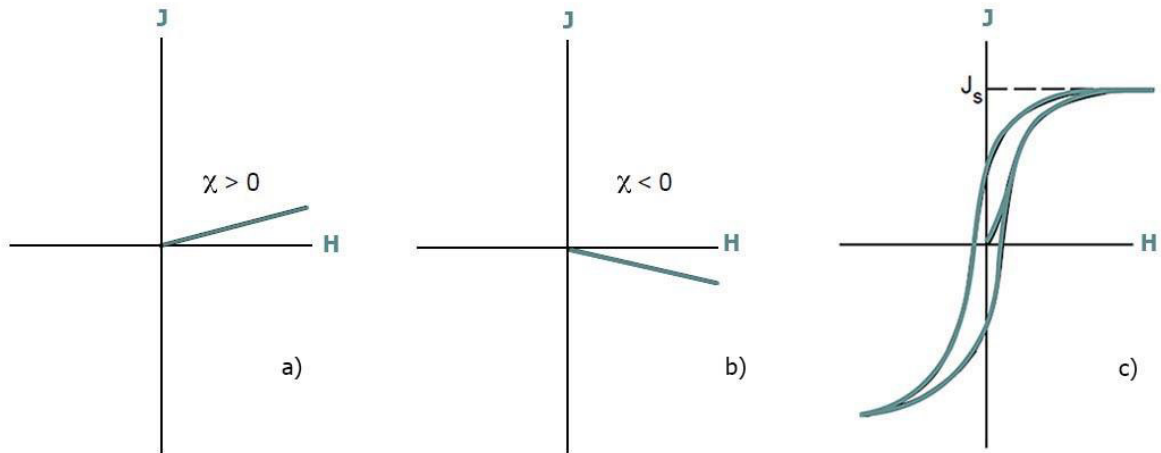


Figura 3-5: Comportamiento de los distintos materiales al graficar magnetización contra campo magnético, a) materiales paramagnéticos, b) materiales diamagnéticos c) materiales ferromagnéticos (Modificado de Butler, 1998).

Ferro, ferri y antiferromagnéticos.

El magnetismo en los materiales se produce por los momentos magnéticos que crean los electrones en movimiento, pero también está relacionado con la interacción entre los átomos y su acomodo en la red cristalina, en la cual actúa la “interacción de intercambio” que es un efecto que no se puede describir con la mecánica clásica, se necesita la mecánica cuántica para entenderla pero básicamente esta nos describe el efecto del acoplamiento entre los orbitales electrónicos. Dependiendo del grado de acoplamiento entre los momentos magnéticos se puede determinar la naturaleza magnética del material.

Los materiales ferromagnéticos igual que los materiales paramagnéticos, contienen átomos con momentos magnéticos, pero también estos momentos magnéticos están fuertemente relacionados, es decir que su interacción de intercambio en sus espines es muy fuerte.

Esta interacción produce la diferencia fundamental con los materiales diamagnéticos la cual es: que al dejar de aplicarle el campo estos minerales siguen guardando esa magnetización. Los minerales magnéticos tienen una magnetización máxima llamada magnetización de saturación J_s , la cual disminuye al aumentar la temperatura y se hace cero a la temperatura de Curie, arriba de esa temperatura el material se vuelve paramagnético.

La interacción de intercambio también nos explica que los espines pueden estar apareados paralelamente o anti paralelamente unos con otros y esto también determina comportamientos magnéticos diferentes. En los materiales ferromagnéticos el acoplamiento es paralelo. En cambio en los materiales antiferromagnéticos el acoplamiento entre las capas es antiparalelo con J_s resultante igual a cero. En los materiales ferrimagnéticos el acoplamiento también es antiparalelo pero de diferente magnitud por lo tanto su comportamiento es parecido a los materiales ferromagnéticos pero con una magnetización menor (figura 3-6).



Figura 3-6: Arreglos de espines en los diferentes comportamientos magnéticos.

3.7.3. Temperatura de Curie y Temperatura de Néel

Dos términos muy importantes en la caracterización de los minerales magnéticos son la temperatura de Curie y la Temperatura de Néel.

En 1895 Pierre Curie descubrió que la relación entre M y la temperatura T es inversa:

$$M = C \frac{B_0}{T}$$

Esta se denomina Ley de Curie y a la constante C se le denomina constante de Curie. Entonces la temperatura de Curie es en la cual un cuerpo ferromagnético pierde su magnetización.

La temperatura de Néel es análoga a la temperatura de Curie pero para los materiales anti-ferrimagnéticos.

3.7.4. Magnetización Remanente Natural

La magnetización remanente natural (NRM) es la capacidad que tienen algunos materiales para guardar la magnetización inducida. La NRM depende del campo magnético y procesos existentes durante la formación del material, así como durante su evolución geológica-historia posterior a esta. La NRM que se adquiere durante la formación de un material, se llama NRM primaria, por lo tanto las componentes secundarias de NRM son aquellas que se crean subsecuentemente y la suma de todas las componentes forman la NRM total:

$$NRM = NRM_{primaria} + NRM_{secundaria}$$

Las bases teóricas de cómo el campo magnético queda preservado fueron estudiadas y establecidas por Louis Néel (1955). Él introdujo el concepto de tiempo de relajación magnética, el cual básicamente es el tiempo que dura la remanencia magnética la cual está en una constante competencia entre la energía anisotrópica y la energía térmica.

$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{vH_c J_s}{2kT}\right)$$

donde:

- C es un factor de frecuencia = $10^8 s^{-1}$
- v = volumen del grano
- H_c = fuerza coercitiva
- J_s = magnetización de saturación
- kT = energía térmica.

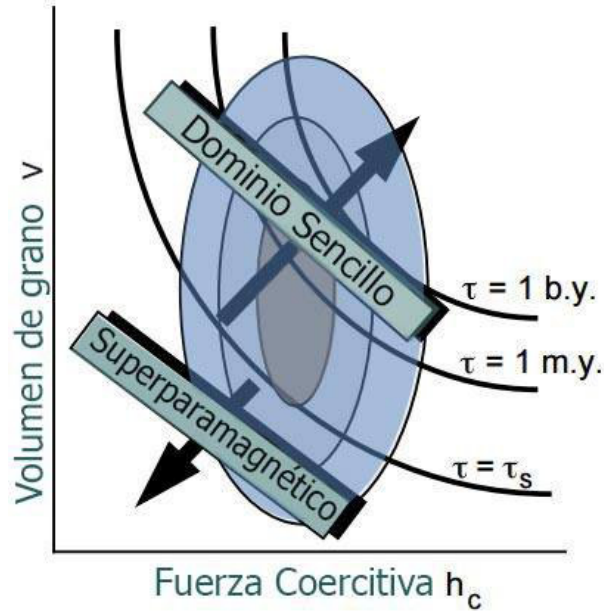


Figura 3-7: Tiempo de relajación (Modificada de Butler, 1998).

Si analizamos la ecuación podemos ver que el tiempo de relajación depende de muchos factores, entre ellos el tamaño de grano y la fuerza coercitiva, así como también observamos que el tiempo de relajación aumenta exponencialmente con el descenso de la temperatura.

Si observamos la figura 3-7 la cual es una gráfica de fuerza coercitiva contra volumen de grano podemos ver que entre mas grande sea el volumen de grano y la fuerza coercitiva sea mas pequeña, el tiempo de relajación es mas grande. Observamos dos zonas de tamaño de grano los de dominio sencillo y los granos superparamagnéticos, que son granos muy pequeños con tiempos de relajación extremadamente pequeños. Existen diferentes formas de adquirir una NRM y son:

Magnetización Termoremanente o TRM

La magnetización termoremanente o TRM es la magnetización que se adquiere al enfriarse un mineral magnético que ha sido sujeto a temperaturas por encima de la temperatura de Curie (T_c) en la presencia de un campo magnético sin cambios físicos ni químicos.

La TRM total, puede ser dividida en porciones que pueden haber sido adquiridas a distintas

temperaturas. Por ejemplo la magnetita tiene diversas ventanas de temperatura de bloqueo, las porciones de TRM adquiridas en cada paso se llaman "TRM parcial." PTRM, cada PTRM es un vector y la TRM es la suma vectorial de todas las PTRM:

$$TRM = \sum_n PTRM(T_{Bn})$$

Las PTRMs individuales solo dependen del campo magnético durante el enfriamiento de su respectiva temperatura de bloqueo (T_b) que es la temperatura a la cual queda sellada la dirección de la remanencia en el grano.

Magnetización remanente química o CRM

Es la magnetización producida por los cambios químicos en los minerales ferromagnéticos por debajo de su temperatura de bloqueo y en un campo magnético producen una magnetización remanente química o CRM. Las reacciones químicas que pueden ocurrir son la alteración de un mineral preexistente, o la precipitación de un mineral ferromagnético de una solución. Esta magnetización es mas común en rocas sedimentarias.

Magnetización Remanente Viscosa o VRM.

Es una magnetización remanente que es gradualmente adquirida durante la exposición un material en campos magnéticos débiles. La VRM natural es una magnetización secundaria resultante de la acción del campo magnético después de la formación de la roca.

Magnetización Remanente Isotermal o IRM

Es la magnetización adquirida durante la exposición de un material en campos magnéticos a temperatura constante (generalmente temperatura ambiente) en presencia de un campo magnético externo (generalmente fuerte). Este tipo de magnetización se produce en el laboratorio donde las muestras son expuestas a campos magnéticos progresivamente más altos, midiendo la remanencia en cada paso. La magnitud y forma de la curva de IRM nos puede ayudar a sugerir la mineralogía magnética, la concentración y el tamaño de grano.

3.7.5. Minerales Magnéticos

Una parte esencial de los estudios paleomagnéticos es saber cuales son los minerales que portan la remanencia magnética.

Óxidos de hierro y de Titanio

Los minerales magnéticos terrestres más importantes y abundantes son los óxidos de hierro estos en su mayoría son soluciones sólidas, es decir que tienen una estructura cristalina homogénea y sólida en donde los átomos de sus moléculas son parcialmente sustituidos sin cambiar la estructura. En los óxidos de hierro, el titanio es el que comúnmente se substituye por hierro. Las distintas composiciones atribuyen diferentes propiedades magnéticas, en el Cuadro 3-1 se resumen las propiedades algunos de minerales importantes. En el paleomagnetismo se tienen dos series fundamentales, la de ulvoespinela-magnetita e ilmenita-hematita, ambas cristalizan cerca de los 1300°C y las podemos observar en el diagrama terciario de la figura 3-8. Los ápices de este diagrama FeO (Wustita), Fe_2O_3 (hematita o maghemita dependiendo de la estructura) y TiO (rutilo)(Tauxe, 2010).

La serie de Titanomagnetitas

Las titanomagnetitas $\text{Fe}_{(3-x)}\text{Ti}_x\text{O}_4$ son minerales muy frecuentes en rocas ígneas, así como muchos minerales de esta serie se pueden formar por oxidación a alta temperatura, también se puede producir por actividad bacteriana. Las titanomagnetitas tienen una estructura cúbica o de espinela inversa a temperatura ambiente, tiene composiciones entre los miembros de magnetita ferrimagnética y ulvoespinela antiferrimagnética, esta serie forma soluciones sólidas arriba de los 800° .

La serie de Ilmeno hematitas o titanohematitas

Las titanohematitas $\text{Ti}_y\text{Fe}_{2-y}\text{O}_3$ son minerales opacos que tienen una estructura de corundo, es decir una estructura rombohedral con un pseudo clivaje que tiende a quebrarse en

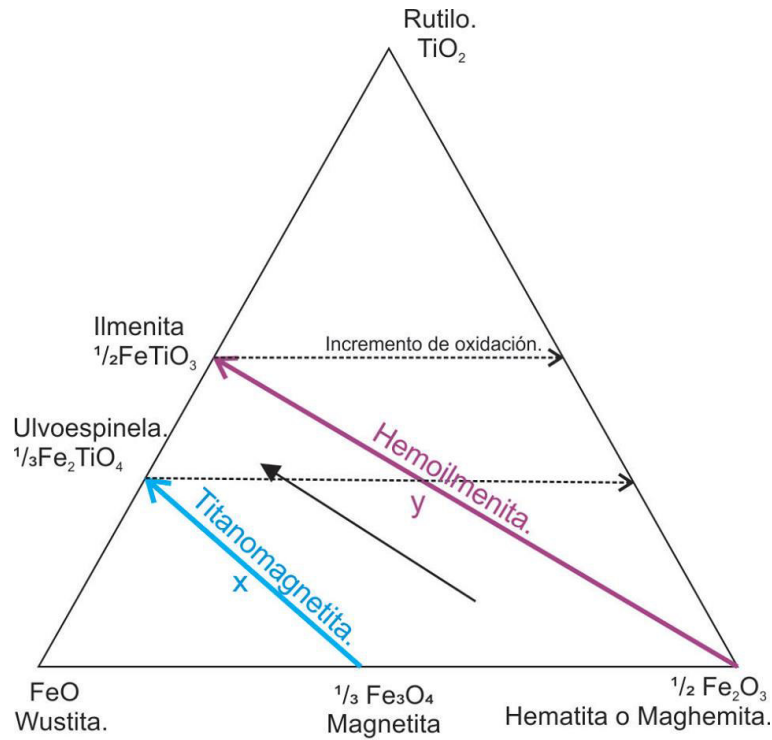


Figura 3-8: Diagrama Ternario para óxidos de hierro.

láminas, además tienen una composición intermedia entre la hematita y la ilmenita. La hematita es antiferromagnética, su temperatura de Curie es de 685° , se forma por la oxidación de sedimentos o algunas rocas ígneas y puede ser de colores negros a rojos.

Hidróxidos de hierro, sulfuros de hierro y otros

Las principales series de minerales magnéticos, son los que mencionamos anteriormente pero también hay otros grupos de minerales, dentro de los hidróxidos de hierro tenemos a la goetita ortorrómbica (αFeOOH), que es un mineral que se forma en abundancia en la naturaleza producto de intemperismo y precursor de la hematita en sedimentos y suelos, es antiferromagnética, su temperatura de Curie es únicamente de 120°C . Dentro de los sulfuros de hierro los minerales más importantes son la pirrotita y greigita, que son comunes en rocas sedimentarias especialmente en rocas asociadas a material fosilizado (Tarling, 1983). En su forma natural el hierro y el níquel comúnmente sólo se encuentran en meteoritos y materiales

| Mineral | Composición Química | Estructura Magnética | $T_C(C^\circ)$ | $J_s (Am^2/kg)$ | Hc |
|---------------|---------------------|----------------------|----------------|-----------------|-------------|
| Óxidos | | | | | |
| Hematita | $\alpha - Fe_2O_3$ | Antiferromagnético | 675 | .4 | 1.5-5 |
| Maghemita | $\gamma - Fe_2O_3$ | Ferrimagnético | 600 | 70-80 | .3 |
| Ilmenita | $FeTiO_3$ | Antiferromagnético | -233 | 0 | - |
| Magnetita | Fe_2O_3 | Ferrimagnético | 575-585 | 90-92 | .3 |
| Sulfuros | | | | | |
| Pirrotita | Fe_7S_8 | Ferrimagnético. | 320 | 20 | .5-1 |
| Oxihidróxidos | | | | | |
| Goetita | $\alpha - FeOOH$ | Antiferromagnético. | 120 | < 1 | > 5 |
| Metales | | | | | |
| Fer | Fe | Ferromagnético | 720 | 218 | < 10^{-4} |

Cuadro 3-1: Propiedades Magnéticas de algunos minerales comunes (Hunt 1995).

extraterrestres.

3.8. Pruebas de propiedades magnéticas

El estudio de las propiedades magnéticas es muy importante, ya que además de sugerirnos los minerales portadores de la NRM, nos asegura la estabilidad de estos, y con esta información se pueden seleccionar las cerámicas que tengan una mayor resistencia a los tratamientos que se aplicarán en el laboratorio y poder obtener un valor de arqueointensidad aceptable. En este trabajo se hicieron análisis de susceptibilidad contra temperatura, desmagnetización térmica e histéresis magnética, estos se explicarán brevemente enseguida.

3.8.1. Susceptibilidad vs. Temperatura

Esta prueba es muy importante en los estudios paleomagnéticos, ya que nos da información acerca de los minerales portadores de la magnetización, así como también de su estabilidad magnética y sus transformaciones.

El calentamiento de una muestra puede inducir cambios químicos tanto en minerales magnéticos como en minerales que no lo son, produciendo la creación o destrucción de minerales magnéticos. Un incremento en la susceptibilidad durante el calentamiento se debe principal-

mente a la formación de óxidos de hierro. Un decremento en la susceptibilidad se debe principalmente a la transformación de los óxidos de magnetita a hematita. Los óxidos magnéticos pueden ser formados a partir de sulfuros de hierro, carbonatos, silicatos y otros óxidos de hierro. Al calentar una muestra obtenemos información de los minerales magnéticos primarios, mientras que la curva de enfriamiento nos da información de los minerales magnéticos secundarios. La reversibilidad entre las dos curvas nos sugiere estabilidad magnética, en cambio cuando las curvas difieren demasiado nos indica que hubo cambios químicos durante el calentamiento. Como cada mineral magnético tiene una temperatura de Curie característica, éstas curvas nos permiten inferir los minerales portadores de la remanencia.

3.8.2. Desmagnetización térmica

La NRM de una muestra puede tener varias componentes, las cuales están contenidas en diferentes secciones del espectro de temperaturas de bloqueo. En paleomagnetismo usualmente se busca determinar la componente primaria y/o característica la cual fue adquirida en el momento de la formación de la roca o del material arqueológico. Las componentes magnéticas secundarias se pudieron haber adquirido por los diversos tipos de adquisición de remanencia como la viscosa y la química en granos de menor estabilidad.

El proceso de desmagnetización térmica consiste en el calentamiento de la muestra a diferentes temperaturas incrementando con un intervalo establecido, y dejando enfriar en campo magnético nulo, para que los granos con temperaturas de bloqueo menores a la expuesta en ese paso adquieran una magnetización térmica $H=0$, esto es progresivo hasta que se alcancen las temperaturas de Curie, y así todos los minerales magnéticos contenidos en la muestra hayan perdido su remanencia. La distribución de las distintas componentes magnéticas nos pueden dar información acerca de cuales son las componentes primarias y secundarias. Para poder obtener las componentes de magnetización M , se grafican en un diagrama de Zijderveld en el cual se combina la intensidad y los cambios de dirección en un sólo diagrama. En la figura 3-9 se observa como se construye el diagrama: en el inciso a) se muestra la proyección del vector NRM en el plano horizontal, en el inciso b) se muestra la proyección del vector en el plano

vertical orientado norte sur, y en el inciso c) de la figura se muestran la combinación del plano vertical y horizontal.

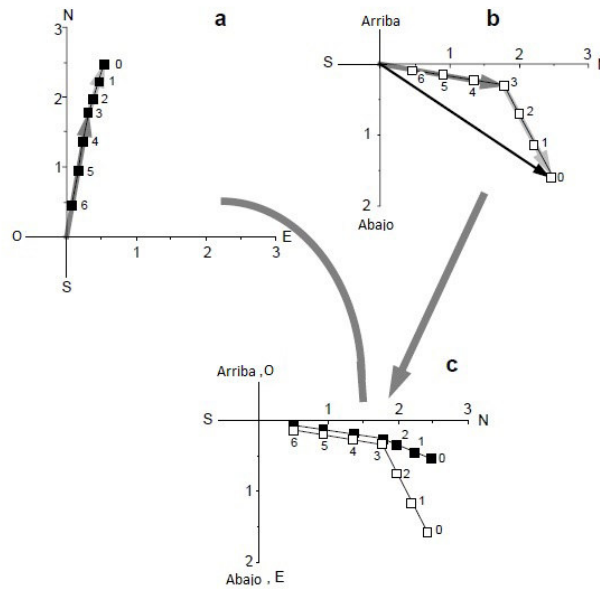


Figura 3-9: Vector de Magnetización M (Modificado de Butler, 1992)

3.8.3. Ciclo de Histéresis

La histéresis magnética ocurre cuando se aplica un campo magnético externo a un material ferromagnético y los dipolos atómicos tienden a alinearse según la dirección del campo aplicado.

La medición de un ciclo de histéresis usualmente comienza aplicando un campo magnético fuerte a la muestra hasta llegar a su valor máximo de magnetización llamado Magnetización de Saturación (M_s), número 1 en el diagrama de la figura 3-10. Este campo después se reduce hasta llegar a cero en donde podemos ver el valor de M_r que es la magnetización remanente (número 2). Después se aplica un campo con la dirección opuesta para obtener valores negativos (número 4) y al final se regresa al campo positivo original (número 5), la H_c o fuerza coercitiva que vemos en el diagrama es el valor del campo H necesario para reducir a cero la magnetización remanente (número 3). Este procedimiento traza el ciclo de histéresis y en

estudios paleomagnéticos o arqueomagnéticos se usan los parámetros de histéresis para inferir el tipo de dominio magnético que tienen los minerales portadores de remanencia de nuestras muestras. Los parámetros de histéresis permiten construir el llamado diagrama de DAY, Day et al (1977). En este diagrama se grafican los parámetros de saturación de magnetización M_r/M_s en función de sus parámetros de coercitividad $H_{c,r}/H_c$. En el diagrama se distinguen tres diferentes zonas referentes a los diferentes dominios que son: dominio sencillo SD, dominiopseudosencillo (PSD) y multidominio (MD).

Otra información que se puede inferir de los ciclos de histéresis es la mineralogía magnética. Sin embargo la forma de las curvas de histéresis en materiales arqueológicos son difíciles de interpretar porque el comportamiento de la curva se produce por la suma de las contribuciones de todas las partículas de la muestra. Esto se debe a la mezcla de minerales con coercitividades y remanencias diferentes, y por tanto también a la mezcla de granos de dominio simple, y dominio pseudosencillo y múltiple. Algunas de las formas de las curvas de histéresis se nombran como: cuello de Ganso y cintura de avispa, colibrí, etc. (Tauxe 1996).

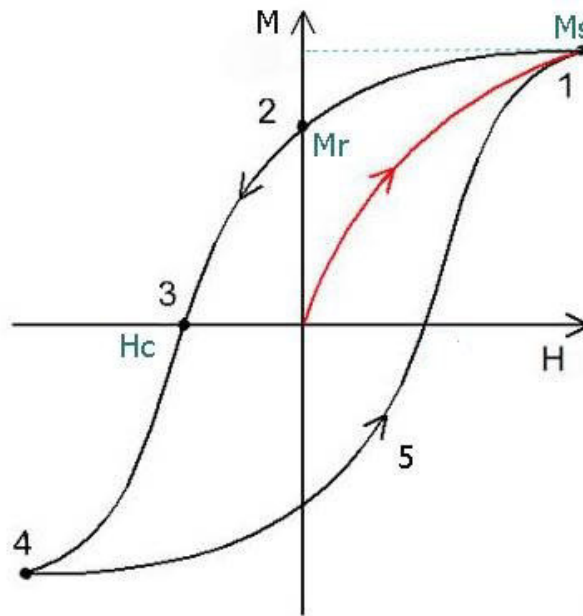


Figura 3-10: Ejemplo de un ciclo de histéresis.

3.9. Arqueointensidad absoluta

Al trabajar con un material que se ha movido del lugar original donde adquirió su remanencia, es imposible hacer estudios direccionales. En este estudio se trabajaron cerámicas, y por tanto el único parámetro geomagnético recuperable es la arqueointensidad.

En un principio es posible determinar la arqueointensidad, debido a que los mecanismos primarios con los cuales los minerales se magnetizan y pueden ser aproximados linealmente es con la siguiente suposición:

$$\frac{H_{anc}}{H_{lab}} = \frac{M_{NRM}}{M_{lab}}$$

$$M_{NRM} \simeq \alpha_{anc} H_{anc}$$

y

$$M_{lab} \simeq \alpha_{lab} H_{lab}$$

Donde α_{lab} y α_{anc} son constantes de proporcionalidad adimensionales, M_{NRM} Y M_{lab} son la remanencia natural y la magnetización remanente del laboratorio, respectivamente H_{anc} y H_{lab} son el campo aplicado antiguo y del laboratorio. Si α_{lab} y α_{anc} son iguales entonces las ecuaciones se resumen a:

$$H_{anc} = \frac{M_{NRM}}{M_{lab}} H_{lab}$$

En otras palabras, si la constante de proporcionalidad es la misma entonces la remanencia está linealmente relacionada con el campo aplicado. Si analizamos la ecuación podemos reconocer una ecuación lineal donde $\frac{M_{NRM}}{M_{lab}}$ es la pendiente la cual está multiplicada por un campo conocido H_{lab}

Cálculo de la Arqueointensidad con TRMs

Como indicaba, las constantes de proporcionalidad α_{lab} y α_{anc} deben ser iguales para el cálculo de la arqueointensidad, el simple hecho de medir la NRM y dar al espécimen una TRM

total no nos garantiza que estas constantes sean iguales. La detección de los cambios en la constante de proporcionalidad causada por la alteración de las fases magnéticas en el mineral producidas por el calentamiento ha sido problema constante a resolver en arqueo y paleointensidad. Los trabajos de Koenigsberger en 1936 y 1938 junto con los experimentos de Thellier y Thellier en 1959 forman una familia de experimentos llamados KTT donde se reemplaza una NRM con remanencias parciales térmicas, estos experimentos son una herramienta poderosa para poder verificar la alteración de las constantes de proporcionalidad.

Dentro de los experimentos KTT hay diferentes métodos que reemplazan la NRM por TRMs en el laboratorio. El método que se utilizó en este trabajo fue el de Thellier-Thellier modificado por Coe(1967) el cual consiste en medir la intensidad en diferentes pasos de calentamiento, en cada paso de temperatura tiene dos etapas una con presencia de un campo conocido y otra en ausencia de campo.

La manera mas clara para representar los datos de intensidad es en un diagrama de Arai donde se grafican los valores de intensidad con campo vs los valores de intensidad con campo de un mismo paso de calentamiento es decir a la misma temperatura

En la figura 3.13 se observa un diagrama de Arai. Además en este experimento para determinar si la capacidad de guardar la remanencia de ese material ha cambiado, se repiten algunos pasos de calentamiento, esto se llama Chequeos de pTRM, donde las diferencias entre la primera y la segunda medición en una temperatura dada indican un cambio en la capacidad de adquirir la remanencia térmica, en la figura 3-13 en el diagrama de Arai se puede ver señalado con amarillo un chequeo del método de Thellier.

Las suposiciones en las que se fundamenta el método de Thellier son:

- Se puede sustituir la NRM por TRMs.
- La remanencia térmica puede ser linealmente aproximada con la aplicación de un campo de baja intensidad externo como se observa en la figura 3-11.
- Se tienen que cumplir las leyes de independencia, aditividad y reciprocidad. La ley de Independencia nos dice que las pTRMs adquiridas durante el enfriamiento entre dos

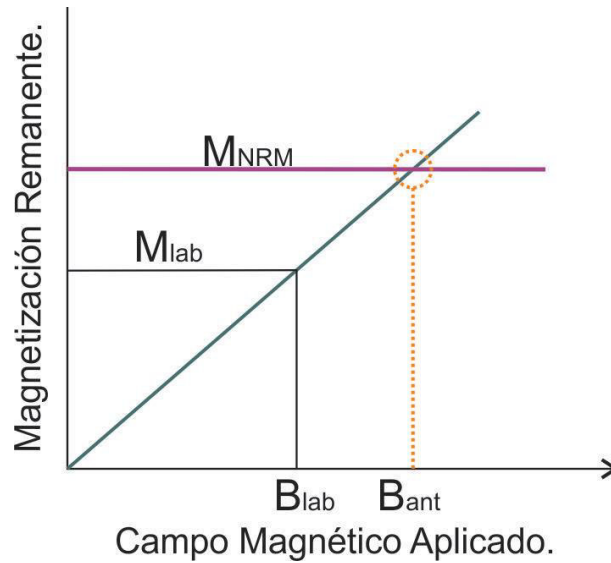


Figura 3-11: Descripción gráfica de la linealidad.

pasos de temperatura son independientes. La ley de Aditividad nos dice la TRM total es la suma de las pTRMs independientes (figura 3-12), es decir que:

$$TRM_{total} = pTRM_1 + pTRM_2 + pTRM_3 + \dots$$

Y la ley de Reciprocidad establece que la temperatura de bloqueo y desbloqueo es la misma.

$$M_1 = M_{NRM}$$

$$M_2 = M_{NRM} + M_{pTRM}$$

Hay algunos parámetros estadísticos establecidos por Coe et al.(1978) modificados después por Prevot et al (1985) que nos permiten validar la calidad de los resultados de arqueointensidad.

- N, El número de puntos obtenidos en un intervalo de temperatura.
- b, la pendiente del diagrama de Arai.

$$b = -\sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}}$$

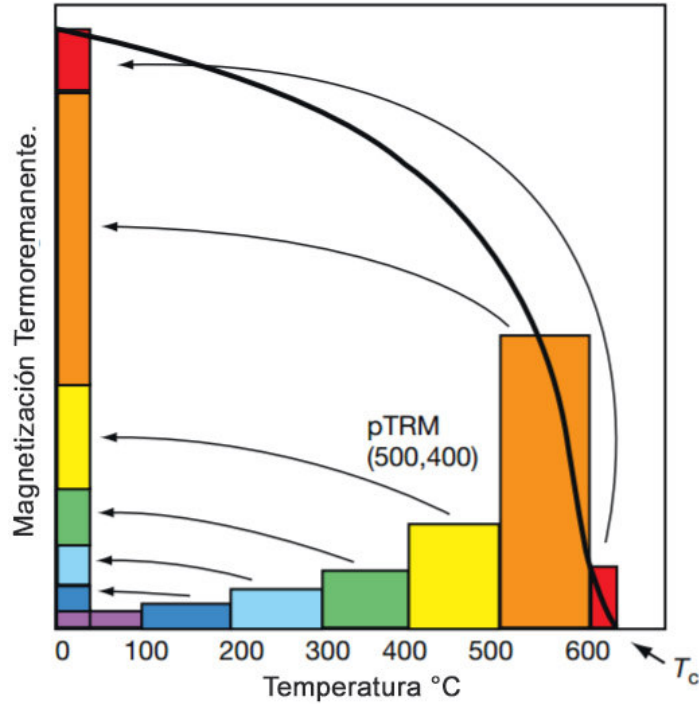


Figura 3-12: Leyes de Independencia y Aditividad.

Donde \bar{y} y \bar{x} son los valores medios.

- σ , es el error estándar de la pendiente y es:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\sum_i (y_i - \bar{y})^2 - 2b\sum_i (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{(N-2)\sum_i (x_i - \bar{x})^2}}$$

- El parámetro $\beta = \frac{\sigma}{|b|}$ es una medida de la incertidumbre de la pendiente debido a la dispersión de los puntos alrededor de la línea media.
- La fracción remanente f está definida por: $f = \frac{\Delta y_r}{y_0}$
donde Δy_r es la longitud del segmento ARN/ATR utilizado para calcular la pendiente.
- El factor gap g es un factor que nos habla de la uniformidad de la separación de las TRMs, cuando tiende a cero describe separaciones menos uniformes.

$$g = \frac{1 - \bar{\Delta y_r}}{\Delta y_r}$$

donde : $\overline{\Delta y_r} = \frac{1}{\Delta y_r} \sum_{i=1}^{i=N-1} \Delta y_i^2$

- El factor de calidad está dado por: $q = \beta f g$

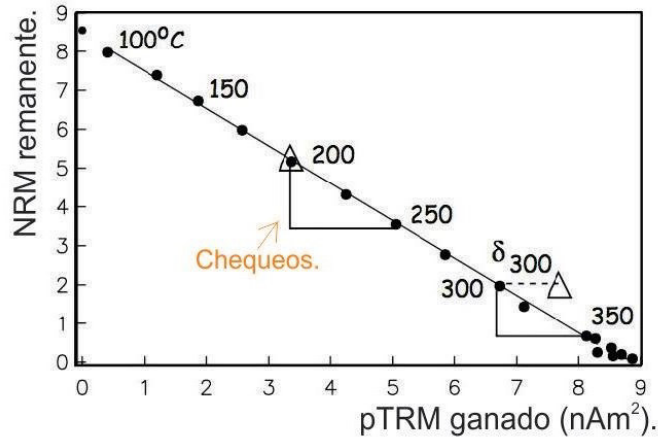


Figura 3-13: Experimento tipo Thellier Thellier.

Con el valor de arqueointensidad que se obtiene podemos calcular el Momento axial dipolar Virtual VADM, que nos da el vector del campo magnético observado en un punto P.

$$VADM = \frac{4\pi R_{Tierra}^3}{\mu_o} \frac{B_{ant}}{\sqrt{1+3\cos^2\theta}}$$

Donde θ = colatitud magnética y B_{ant} es la arqueointensidad que calculamos.

3.10. Datación Arqueomagnética

Como mencionaba anteriormente, si materiales ricos en minerales ferromagnéticos son calentados arriba del punto de Curie y después enfriados bajo el efecto del campo magnético Terrestre, estos materiales adquieren una magnetización termoremanente. En Arqueomagnetismo hay muchos materiales que cumplen con esta regla como son hornos, pisos, cerámicas, paredes y pisos quemados, entre otros.

También es interesante mencionar que hay otros materiales que sirven para fines arqueomagnéticos, por ejemplo, materiales que adquieren una remanencia detrítica producida cuando el campo magnético terrestre alinea partículas magnéticas suspendidas en alguna solución y son gradualmente depositadas como sedimentos o pinturas rupestres.

Para determinar la edad de adquisición de la remanencia, los parámetros magnéticos ya sean de dirección o arqueointensidad se comparan con curvas de variación secular (CVPS) de algún parámetro geomagnético como declinación, inclinación o intensidad. En las últimas décadas se han efectuado estudios para obtener datos para construir estas curvas de variación secular. La calidad de la calibración de la CVPS de un área depende de la densidad de los datos. Asimismo, basados en estos datos se han construido distintos modelos del campo geomagnético que abarcan varios miles de años, estos modelos generan también CVPS y pueden ser regionales y globales. En el cuadro 3-2 se observan algunos ejemplos de curvas y modelos que se han construido en los últimos años.

Cuadro 3-2: Algunas de las curvas maestras de variación paleosecular existentes. Modificado de Pavón-Carrasco et al., 2011.

| Regiones/Países | Tiempo inicial. | Tiempo Final. | Locación de Referencia. | Tipo de Datos. | Referencias. |
|---|-----------------|---------------|---|----------------|------------------------------|
| Curvas de Variación Secular. | | | | | |
| Austria | -940 | 1850 | Radstadt (47.38N/13.45E) | A | Schnepp y Lanos (2006) |
| Italia | -1160 | 1630 | Viterbo (42.45N/12.03E) | A | Tema et al. (2006) |
| Modelos Regionales. | | | | | |
| Europa, Norte de África Y Oeste de Asia (SCHA.DIF.14K) | -1000 | 1900 | Cualquier punto de la región seleccionada. | A, SL | Pavón-Carrasco et al. (2009) |
| Modelos Globales. | | | | | |
| Global (ARCH3K.1) | -1000 | 990 | Cualquier punto del mundo. | A,FL | Korte et al. (2009) |
| Global (SED3K.1) | -1000 | 990 | Cualquier punto del mundo. | SL | Korte et al. (2009) |
| Global (CAL3K.3) | -1000 | 990 | Cualquier punto del mundo. | A,SL,FL | Korte et al. (2009) |

La ventaja principal de hacer datación por arqueointensidad es que se puede realizar en materiales no orientados, como las cerámicas, las cuales son fuente primaria y directa de información arqueológica.

Capítulo 4

Metodología

Se utilizaron 40 fragmentos de cerámica de dos diferentes tipos, Mimbres y Ramos provenientes de los siguientes sitios arqueológicos: Galeana (245207; 3334395), Villa Ahumada (353822; 3385889), Paquimé (216805; 3362850), CH3-3(308536; 3474757), CH3-A(310174; 3472949).

Estas cerámicas proporcionadas por el Arqueólogo Rafael Cruz Antillón de INAH, Chihuahua por lo tanto no hubo una etapa de muestreo. La distribución de las cerámicas la observamos en el cuadro 4-1:

| Espécimen | Localidad o tipo | Tipo cerámico. |
|-----------|------------------|----------------|
| 1-4 | Villa Ahumada | Mimbres |
| 5-14 | Villa Ahumada | Ramos |
| 15-16 | Paquimé | Mimbres |
| 17-23 | Paquimé | Ramos |
| 24-31 | Samalayuca | Mimbres |
| 32 | Galeana | Mimbres |
| 33-40 | Galeana | Ramos |

Cuadro 4-1: Distribución de las cerámicas.

Para realizar el proceso del cálculo de arqueointensidad la metodología se dividió en tres principales etapas: Preparación de las muestras, selección de las muestras, y cálculo de Arqueointensidad. Todos los experimentos se realizaron en el laboratorio de Paleomagnetismo

del Instituto de Geofísica de la UNAM.

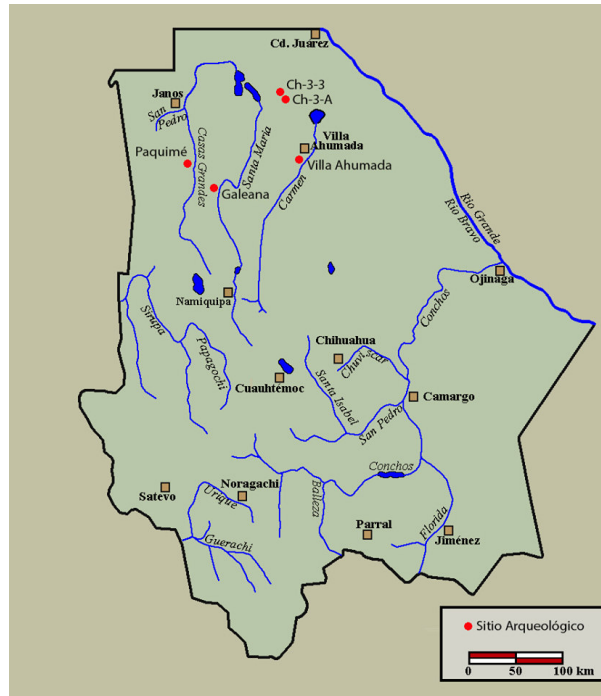


Figura 4-1: Mapa con los sitios arqueológicos de donde fueron colectadas las cerámicas

4.1. Etapa 1. Preparación de las muestras

La primera etapa consistió en la clasificación y el cortado de las muestras. Se cortaron 2 fragmentos en forma de prismas rectangulares de aproximadamente $2 \times 0.5 \text{ cm} \times$ el grosor (característico de cada cerámica aproximadamente de 3 mm). Uno de los fragmentos se usó para desmagnetización por temperatura y el otro (en el caso de haber sido seleccionado) para el proceso de arqueointensidad, además se cortaron dos fragmentos más pequeños uno para susceptibilidad *vs.* temperatura y el otro para histéresis magnética e IRM.



Figura 4-2: Muestras cerámicas cortadas para cada experimento.

4.2. Etapa 2. Selección de las muestras

Cuando se hace un estudio paleomagnético se busca que la remanencia adquirida sea la que se guardó a la hora de depositarse o enfriarse el material, pero muchas veces la NRM cambia con el tiempo. Si pensamos un poco en termodinámica sabemos que un sistema intenta llegar al equilibrio con su ambiente. En este caso las partículas magnetizadas fuera del equilibrio con el campo magnético externo sufren lo que sería magnetización viscosa. Por lo tanto hay diferentes metodologías que se utilizan para que se obtengan resultados de calidad utilizando especímenes con suficiente estabilidad que guarden la magnetización primaria.

Lo primero que tenemos que asegurar es que las muestras cumplan con los siguientes criterios:

1. La magnetización remanente característica debe ser una única magnetización termoremanente.
2. Las propiedades magnéticas de las muestras deben ser estables y una forma de evaluarlo es comparando las curvas de calentamiento y enfriamiento en los experimentos de Susceptibilidad vs. Temperatura las cuales tienen que coincidir.
3. Los minerales magnéticos deben ser de dominio simple o dominio pseudo-sencillo para

que cumplan las leyes independencia y de aditividad (Thellier y Thellier, 1959).

Por lo tanto en esta etapa se llevaron a cabo los experimentos de propiedades magnéticas que fueron: Susceptibilidad vs. temperatura, ciclo de histéresis e IRM y desmagnetización por temperatura con el fin de seleccionar las muestras a utilizarse para el proceso de arqueointensidad.

4.2.1. Experimentos de susceptibilidad magnética contra temperatura

Para esta prueba se escogió una cerámica de cada localidad y de cada tipo cerámico, se molió cada una de las muestras y se calentaron hasta los 650°C aproximadamente, donde con incrementos de diez grados el aparato midió la susceptibilidad magnética. Al llegar a la temperatura máxima programada, se enfría la muestra midiendo también su susceptibilidad. Estos valores se grafican y se comparan las curvas de calentamiento y de enfriamiento. Las mediciones se hicieron en un sistema para medir susceptibilidad MS2 Bartington para altas temperaturas.

4.2.2. Desmagnetización térmica y diagramas Vectoriales

La desmagnetización térmica se realizó a los 40 fragmentos de cerámica. Se usó un horno donde se seleccionaron calentamientos desde los 300° hasta los 520°, en cada paso de calentamiento se midió nuevamente la dirección y la magnitud de remanencia residual, para después graficar los datos en un diagrama vectorial y poder establecer las componentes de magnetización. Para este experimento se utilizó un magnetómetro de giro AGICO JR6.

4.2.3. Histéresis magnética

Para poder hacer estas mediciones se cortaron muestras pequeñas de alrededor de 30mg y se midieron en el equipo Micromag Alternating Gradient Field Magnetometer, aplicandose un campo máximo de 1.2 T.

4.3. Etapa 3. Cálculo de la arqueointensidad

Para el proceso de arqueointensidad se utilizó el método de Thellier-Thellier modificado por Coe, los pasos se ejemplifican en el siguiente diagrama:

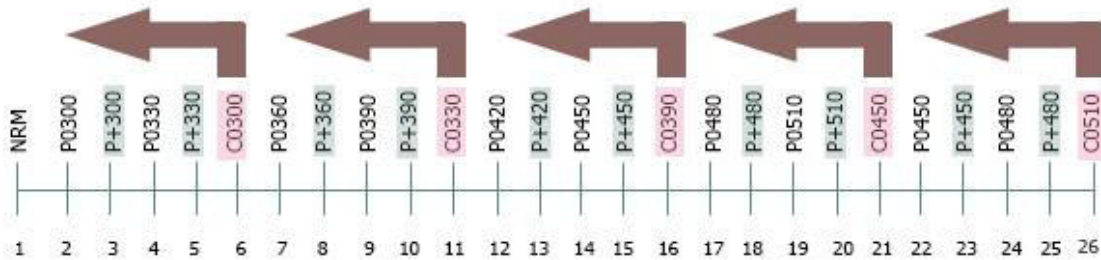


Figura 4-3: Diagrama que ejemplifica los pasos del proceso Thellier Thellier que se utilizaron.

El proceso consistió en 26 pasos, donde las flechas café y los pasos en rosa indican los chequeos, los pasos sombreados con verde nos indican calentamiento con campo aplicado y los pasos sin sombreado nos indican las mediciones que se realizaron sin campo.

Nosotros planeamos los pasos de la siguiente manera: Primero se midió la NRM característica del espécimen sin calentar la muestra, después en el primer paso de calentamiento se calentó la muestra a 300°C y se midió su intensidad, en el segundo paso se calentó la misma muestra a la misma T pero con un campo aplicado en este caso de $40 \mu\text{T}$ y así hasta completar los 26 pasos, también cada cinco pasos se hacía el chequeo donde sin campo se medía la intensidad del espécimen con la temperatura de hace cuatro pasos. En este experimento se utilizó un magnetómetro de giro JR6, una Fuente de corriente BK Precision 1735 y un horno MMTD24 Magnetic Measurements.

Los valores calculados de intensidad para ser considerados aceptables deben de cumplir distintas características. Primero, al graficarse en el diagrama de Arai (Nagata 1965) debe haber una linealidad, la recta característica en el diagrama debe contener mas de cinco puntos $N > 5$ el factor q debe ser ≥ 3 y la fracción f debe ser mayor al 30%.

Con los valores de intensidad se calcularon los Polos Geomagnéticos Virtuales y posteriormente se hizo la datación Arqueomagnética usando el software de matlab creado por Pavón-Carrasco(2011).

Capítulo 5

Resultados

5.1. Propiedades magnéticas para la selección de las cerámicas aptas

5.1.1. Curvas de k vs. T

En las curvas de susceptibilidad contra temperatura la mayoría de las cerámicas resultaron reversibles o casi reversibles. Analizando las temperaturas de Curie, se observan tres comportamientos muy característicos:

- Tipo 1: Se caracteriza por muestras reversibles o casi reversibles con dos puntos de Curie, uno entre los 200-300°C y otro a los 500-600°C característicos de magnetita o titanomagnetitas pobres en Ti, muestras con dos puntos de Curie podrían sugerir una mezcla de titanomagnetitas pobres y ricas en titanio los especímenes de este tipo son los de la figuras 5-1,5-2,5-3.
- Tipo 2: Este comportamiento sólo lo presentaron 2 especímenes y se muestran en la figura 5-4, son comportamientos reversibles con distintos puntos de Curie.
- Tipo 3: Estos especímenes al principio del calentamiento muestran una susceptibilidad ligeramente más alta que en el enfriamiento, aún así al ser casi reversibles se eligieron

(figura 5-5).

- Tipo 4: Comportamiento irreversible donde en el enfriamiento hubo un aumento notorio de la susceptibilidad, esto se debe a un cambio de fase mineralógica donde se produjo posiblemente Ti.

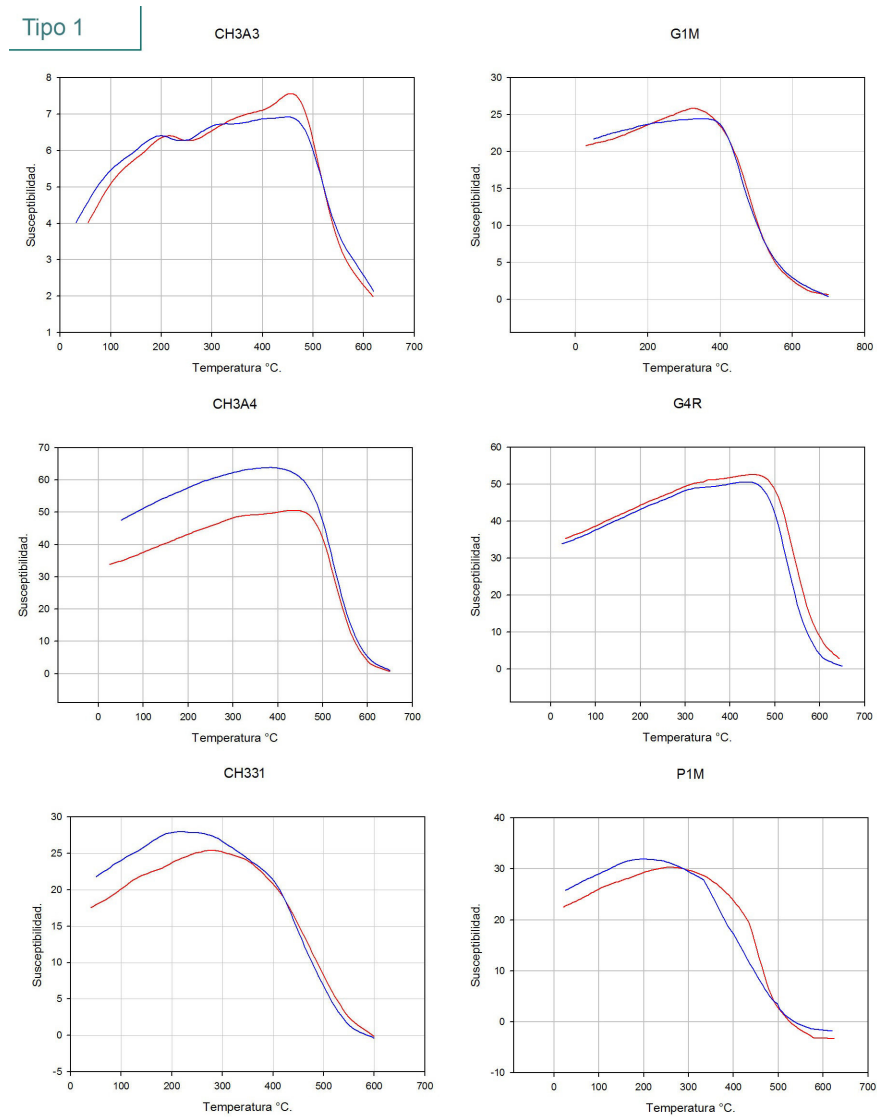


Figura 5-1: Especímenes que presentan comportamientos tipo 1.

Tipo 1

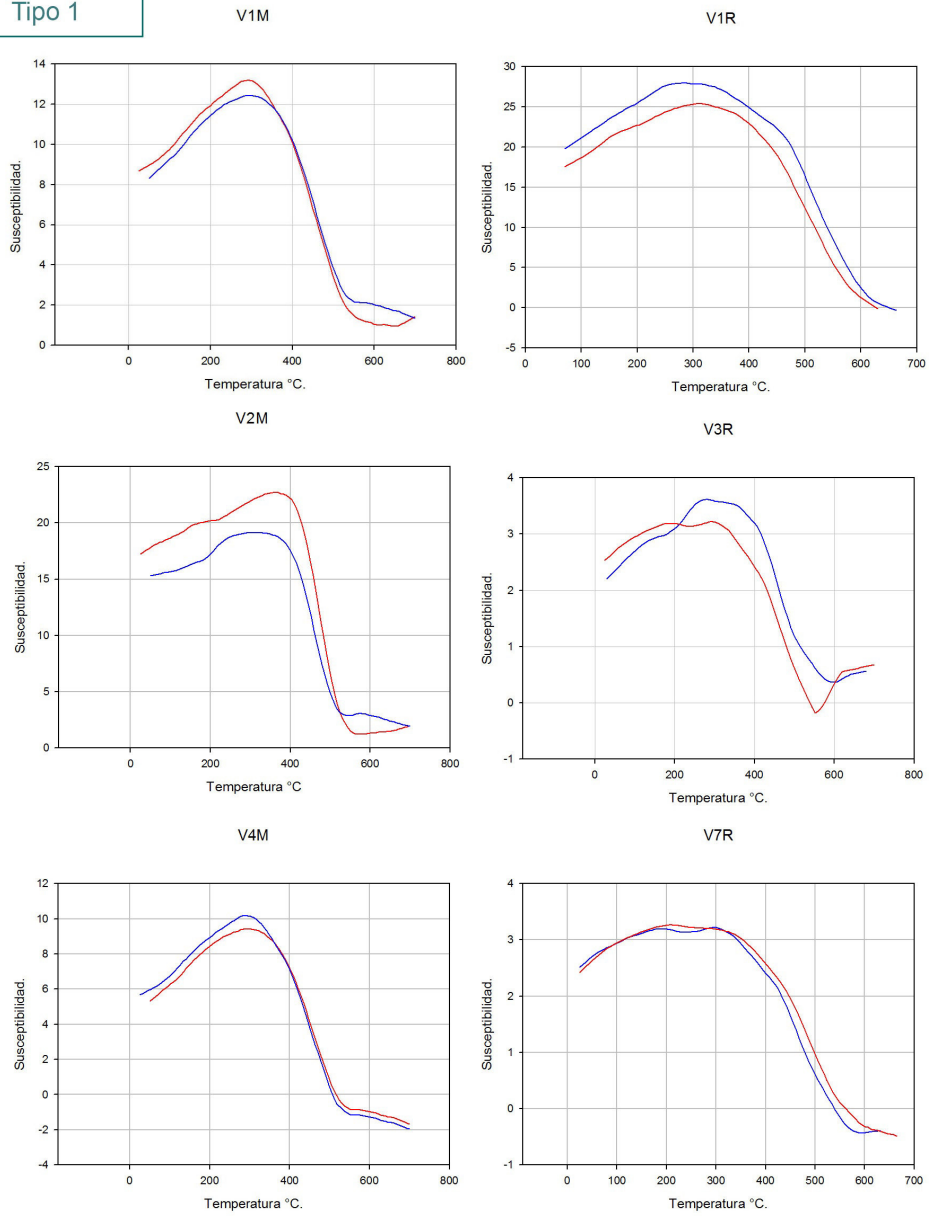


Figura 5-2: Especímenes que presentan comportamientos tipo 1.

Tipo 1

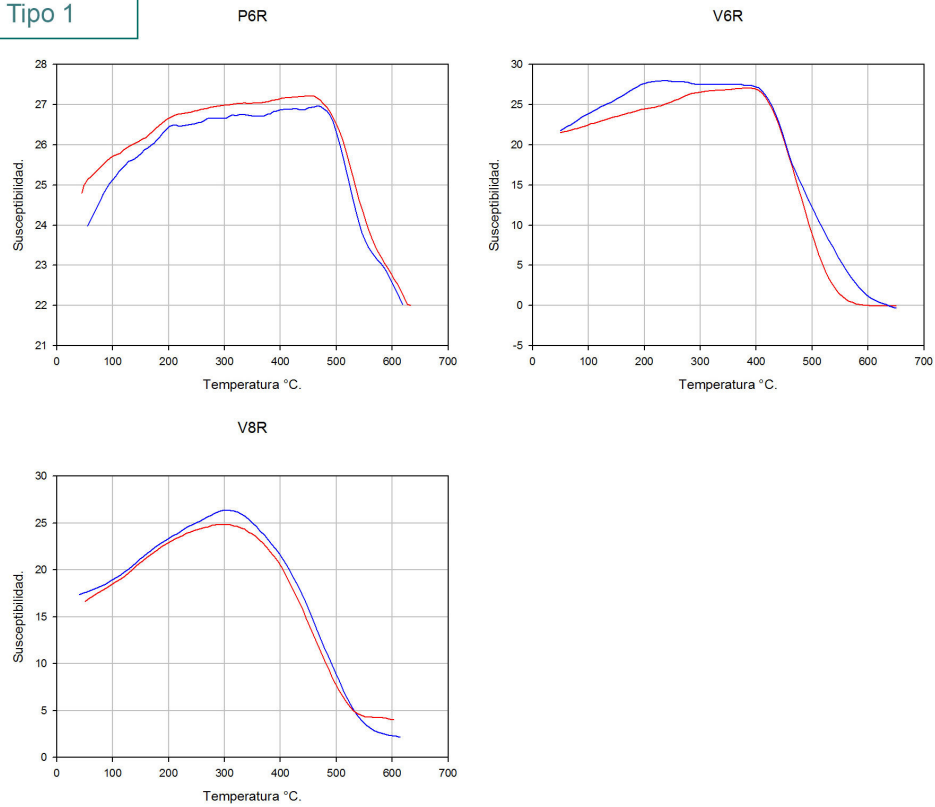


Figura 5-3: Especímenes que presentan comportamientos tipo 1.

Tipo 2

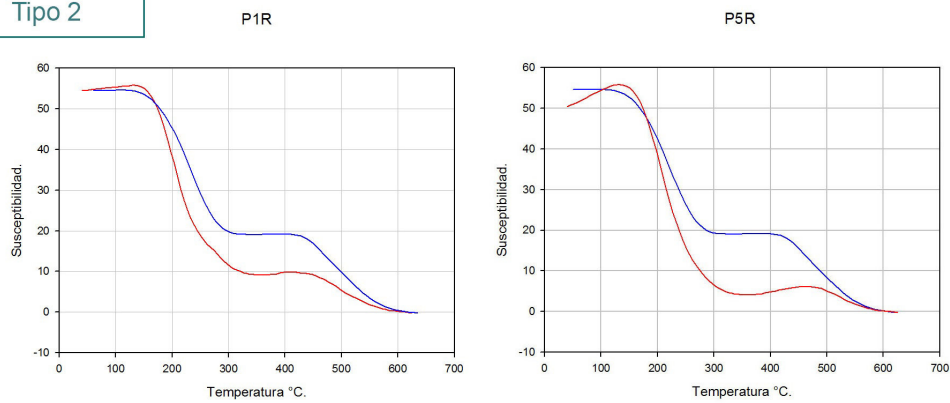


Figura 5-4: Especímenes que presentan comportamientos tipo 2.

Tipo 3

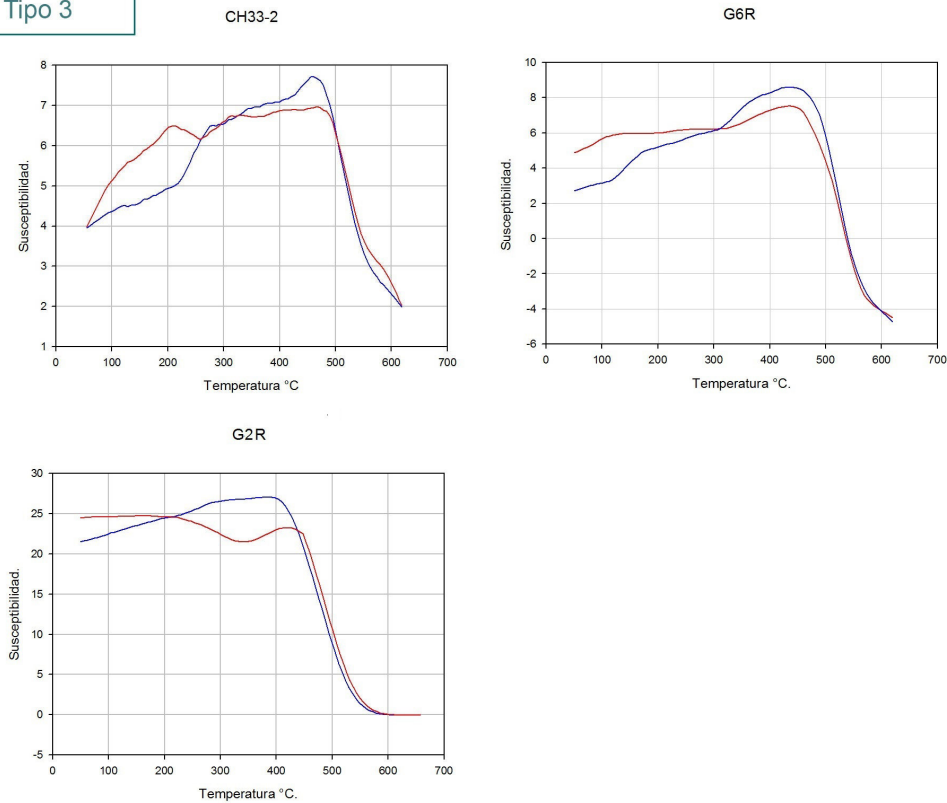


Figura 5-5: Especímenes que presentan comportamientos tipo 3.

5.1.2. Diagramas Vectoriales

En el caso de diagramas vectoriales se observaron diversos comportamientos:

1. Comportamiento univectorial mostrado en pocas cerámicas. Un ejemplo es la V1M.
2. La mayoría de los especímenes elegidos tuvieron este tipo de comportamiento, en el cual se observa una componente pequeña en los primeros pasos de medición como se puede observar en los especímenes CH331-M y G1M.
3. Se caracteriza por sus diagramas curvos donde hay más de una componente y en el proceso no fue posible distinguirlos. Estos especímenes no se eligieron para el proceso de arqueointensidad ya que sugieren componentes magnéticas traslapadas.

En las siguientes figuras se muestran los diagramas vectoriales, divididos según su comportamiento en los diagrama de Susceptibilidad contra Temperatura. Los del tipo 1 son las figuras 5-6, 5-7 y 5-8; los del tipo 2 corresponden a la figura 5-9; comportamientos tipo 3 corresponden a la figura 5-10 y finalmente la figura 5-11 corresponde a especímenes los cuales a pesar de no haberseles realizado el experimento de Suceptibilidad vs. Temperatura dado su comportamiento prácticamente univectorial también fueron elegidas.

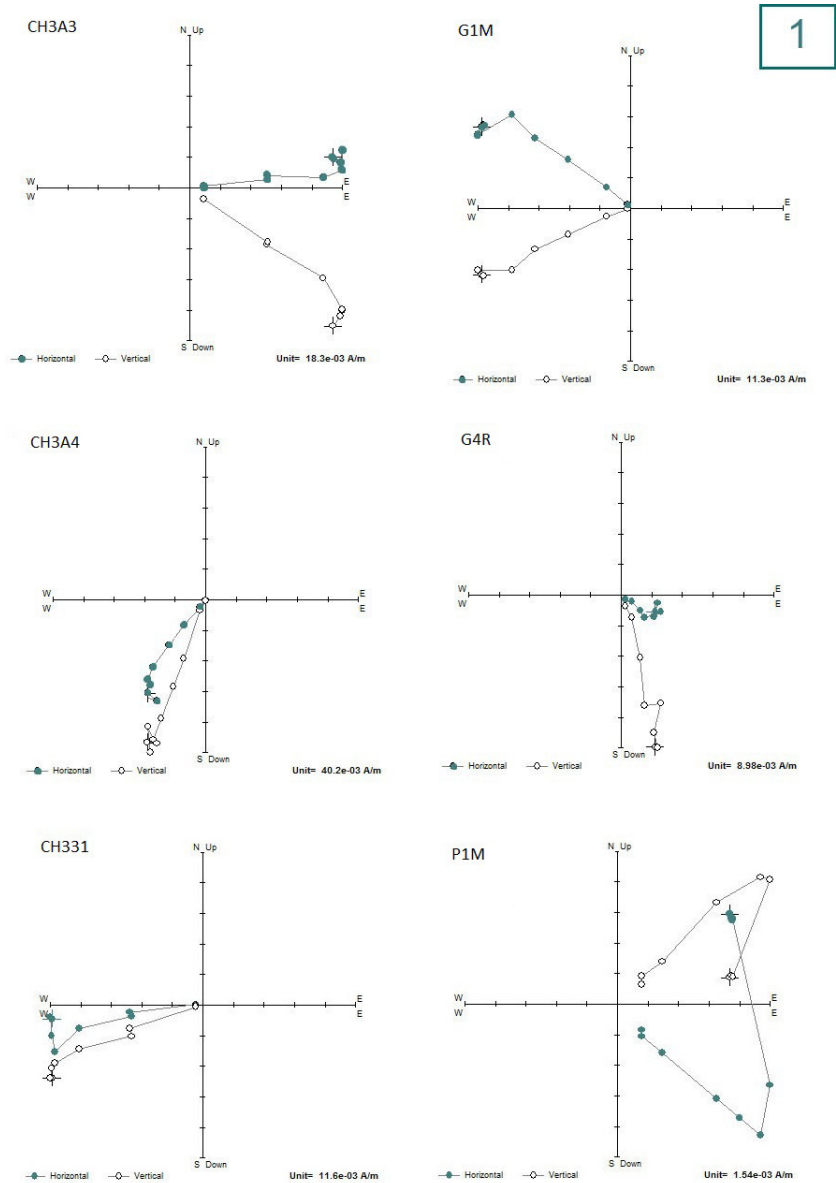


Figura 5-6: Diagramas Vectoriales correspondientes al tipo 1 según kvST.

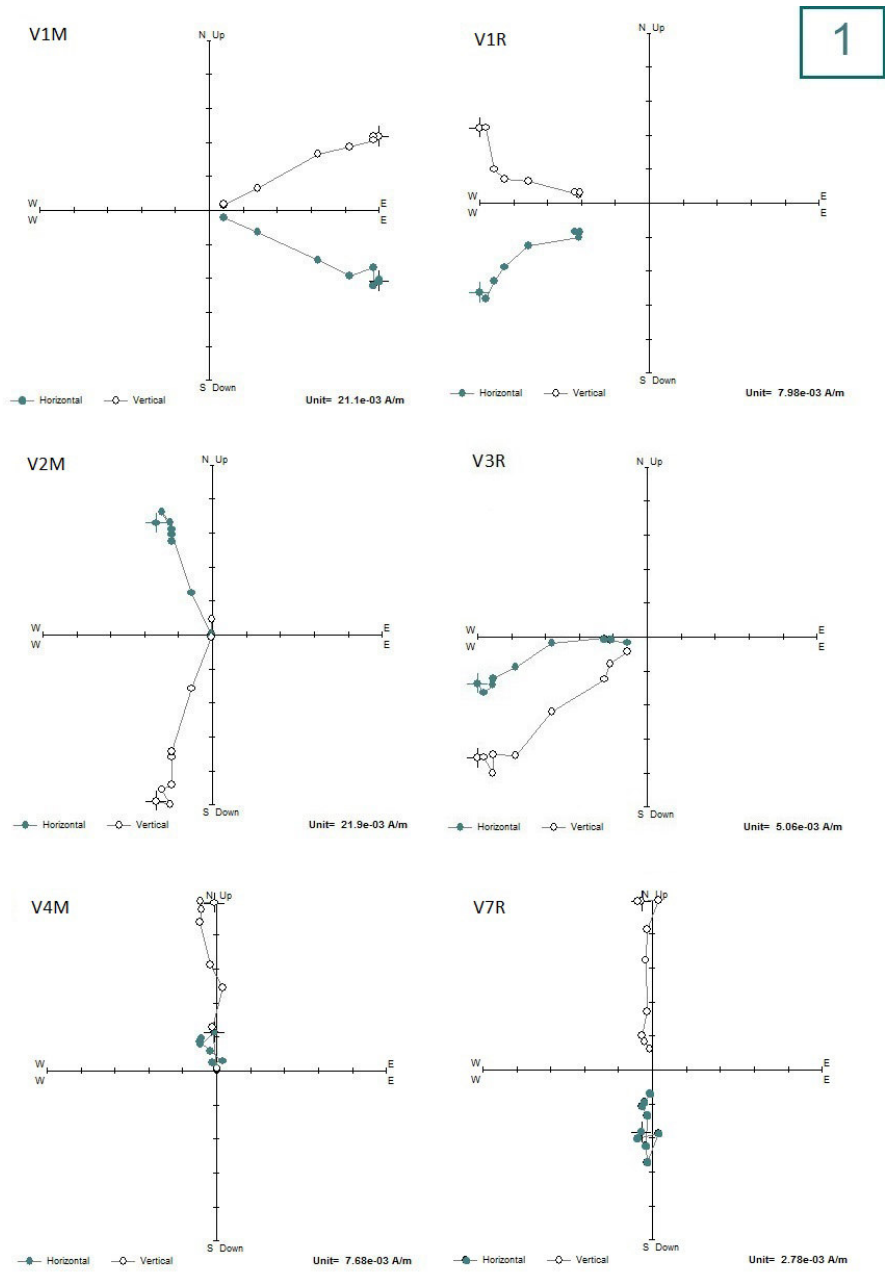


Figura 5-7: Diagramas Vectoriales correspondientes al tipo 1 según kvST.

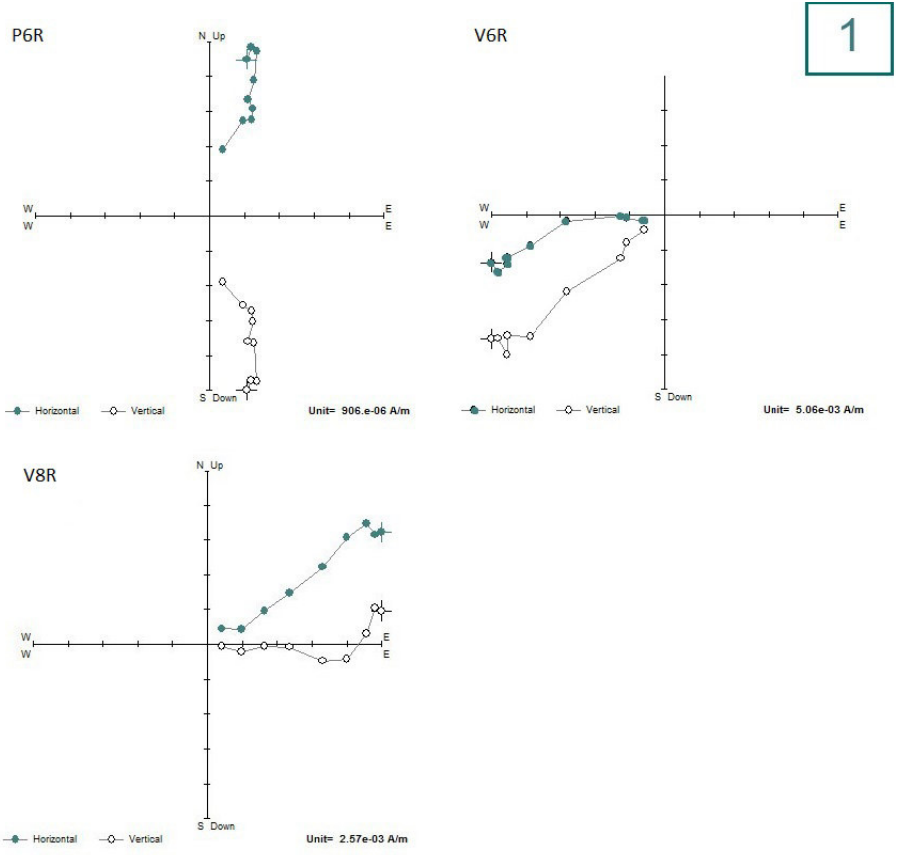


Figura 5-8: Diagramas Vectoriales correspondientes al tipo 1 según kvST.

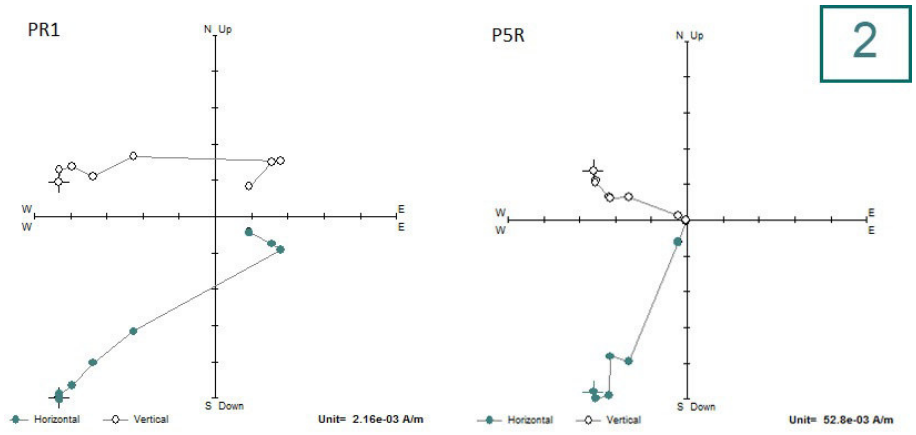


Figura 5-9: Diagramas Vectoriales correspondientes al tipo 2 según kvST.

3

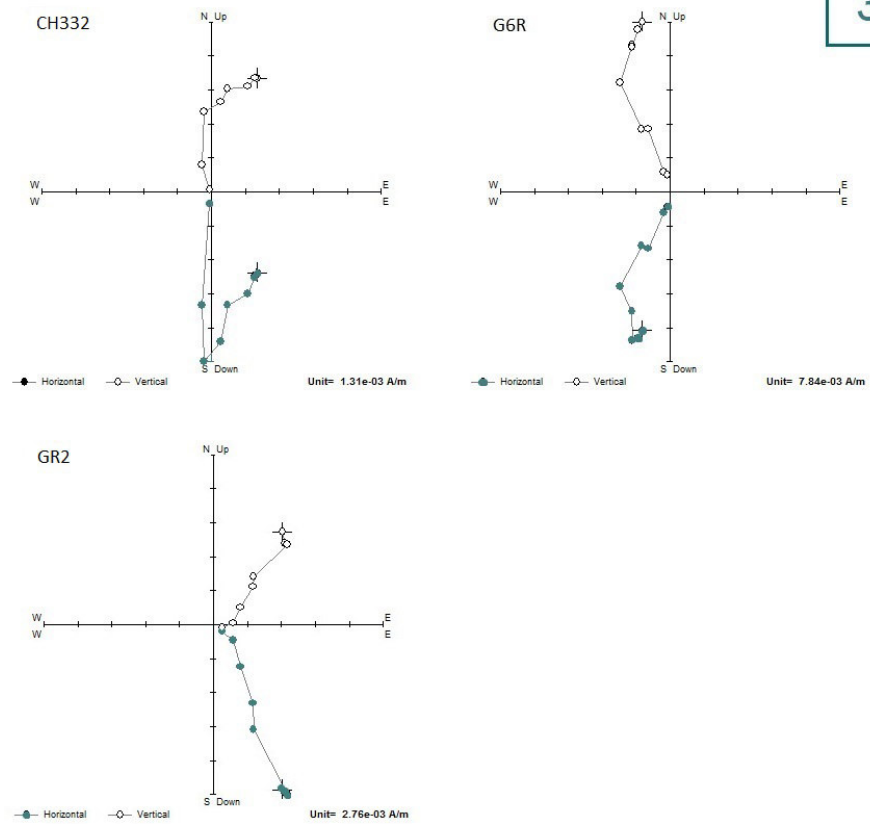


Figura 5-10: Diagramas Vectoriales correspondientes al tipo 3 según kvsT.

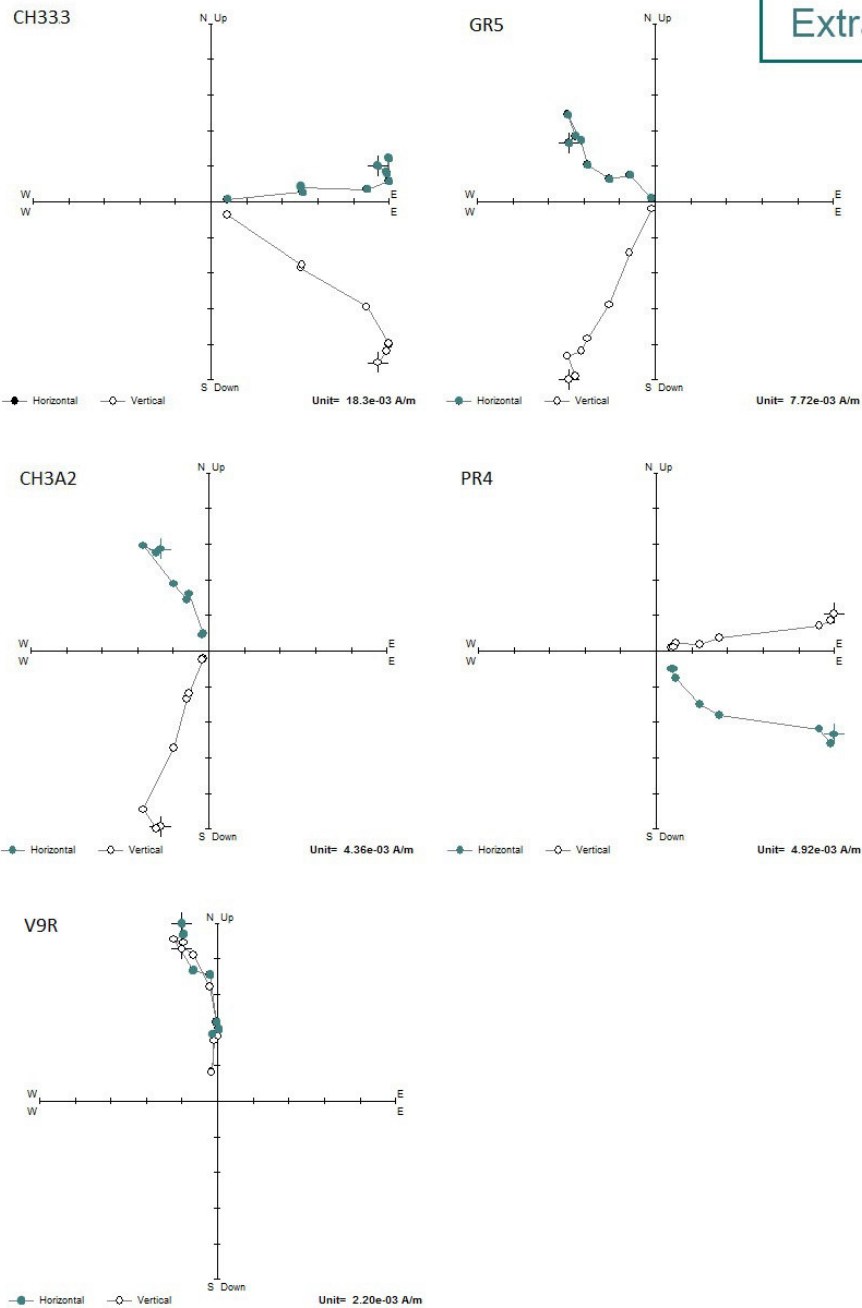


Figura 5-11: Diagramas Vectoriales extras que se eligieron.

5.1.3. Histéresis y Diagrama de DAY

Se tomaron micromuestras de 25 cerámicas para obtener los ciclos de Histéresis e IRM.

Los resultados se graficaron en el diagrama de DAY modificado por Dunlop(2002). En la figura 5-12 podemos observar que el tipo Mimbres tiene valores de magnetización $0.10 < M_r/M_s < 0.29$ y sus valores de coercitividad están entre $1.69 < H_{cr}/H_c < 6.0$. Las cerámicas tipo Ramos tiene valores de magnetización $0.06 < M_r/M_s < 0.24$, y $1.84 < H_{cr}/H_c < 4.81$ de coercitividad. Estas diferencias en las mezclas muestran dos distribuciones de tamaño de grano pertenecientes para cada tipo de cerámica. La mayoría de las muestras tienen minerales con un dominio pseudo sencillo(PSD) con tendencia a sencillo (SD).

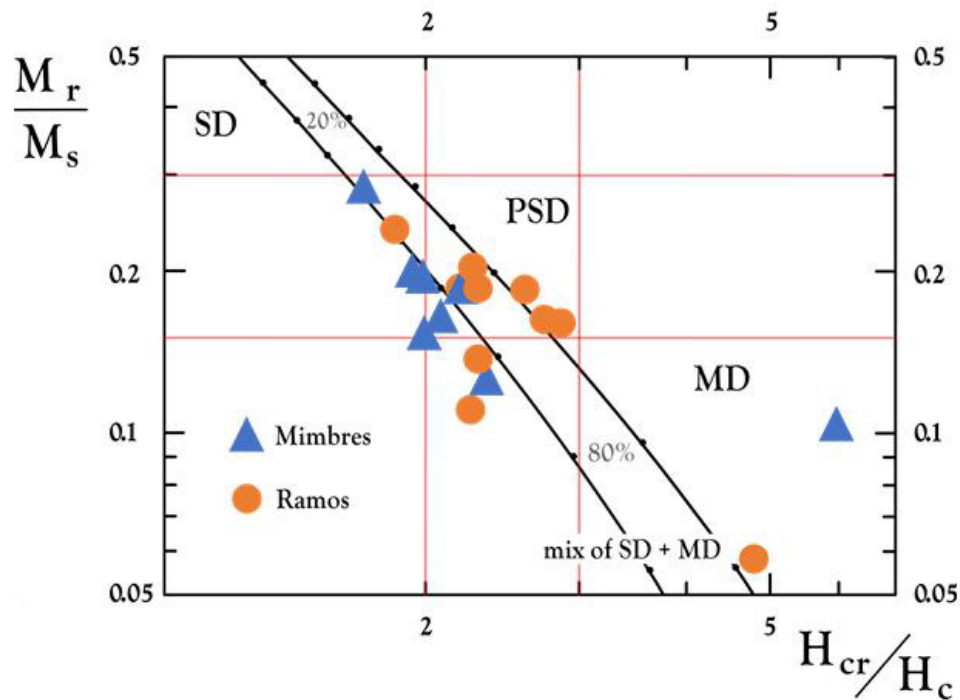


Figura 5-12: Diagrama de DAY de todas las muestras analizadas.

5.2. Arqueointensidad

Se realizó el proceso de arqueointensidad a 25 muestras, 11 de Mimbres y 14 de Ramos, los cuales se muestran en el cuadro 5-1, además se anotó el tipo de comportamiento 1, 2, 3 ó 0 del grupo extra. Los datos se analizaron con el software Thellier Tool de Leonhardt et al.

(2004), obteniéndose 9 resultados buenos de arqueointensidad al someterse a los criterios de calidad de Coe (1978), los resultados satisfactorios se redujeron a sólo 5 de Mimbres y 4 de Ramos, lo que significa un porcentaje de éxito bajo.

Los diagramas que cumplieron los parámetros de calidad de Coe se muestran en las figuras 5-13 para Ramos y la figura 5-14 para Mimbres.

Cuadro 5-1: Lista de muestras seleccionadas.

| MIMBRES | Nombre | kT | RAMOS | Nombre | kT |
|---------|--------|----|-------|--------|----|
| | CH331 | 1 | | G2R | 3 |
| | CH332 | 3 | | G3R | 3 |
| | CH333 | 0 | | G4R | 1 |
| | CH3A2 | 0 | | G5R | 0 |
| | CH3A3 | 1 | | G6R | 3 |
| | CH3A4 | 1 | | P1R | 2 |
| | G1M | 1 | | P5R | 2 |
| | P1M | 1 | | P4R | 0 |
| | V1M | 1 | | V1R | 1 |
| | V2M | 1 | | V3R | 1 |
| | V4M | 1 | | V6R | 1 |
| | | | | V7R | 1 |
| | | | | V8R | 1 |
| | | | | V9R | 0 |

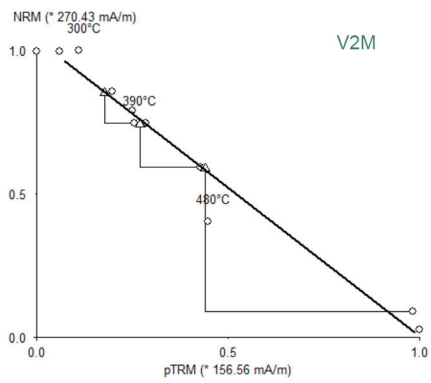
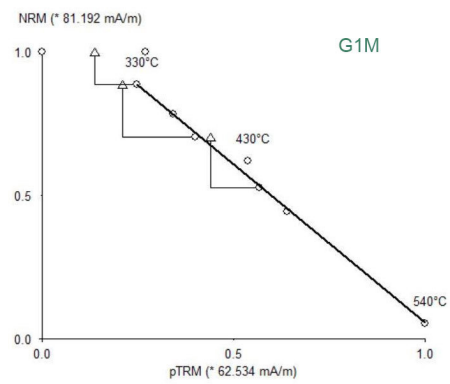
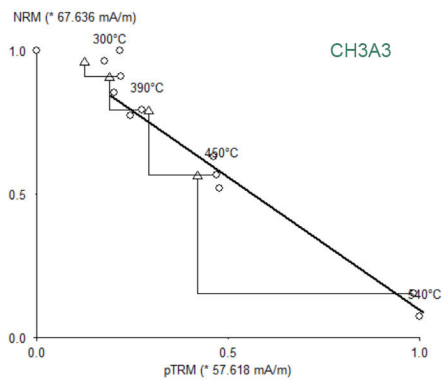
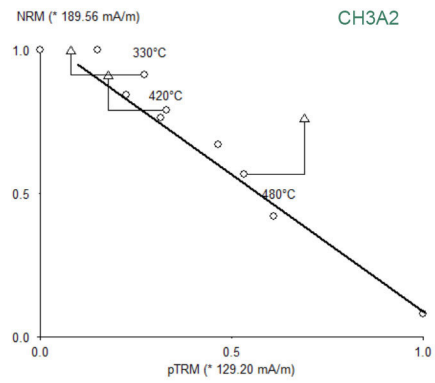
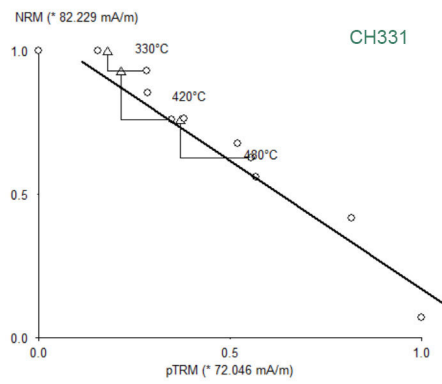


Figura 5-13: Diagramas de Arai Mimbres.

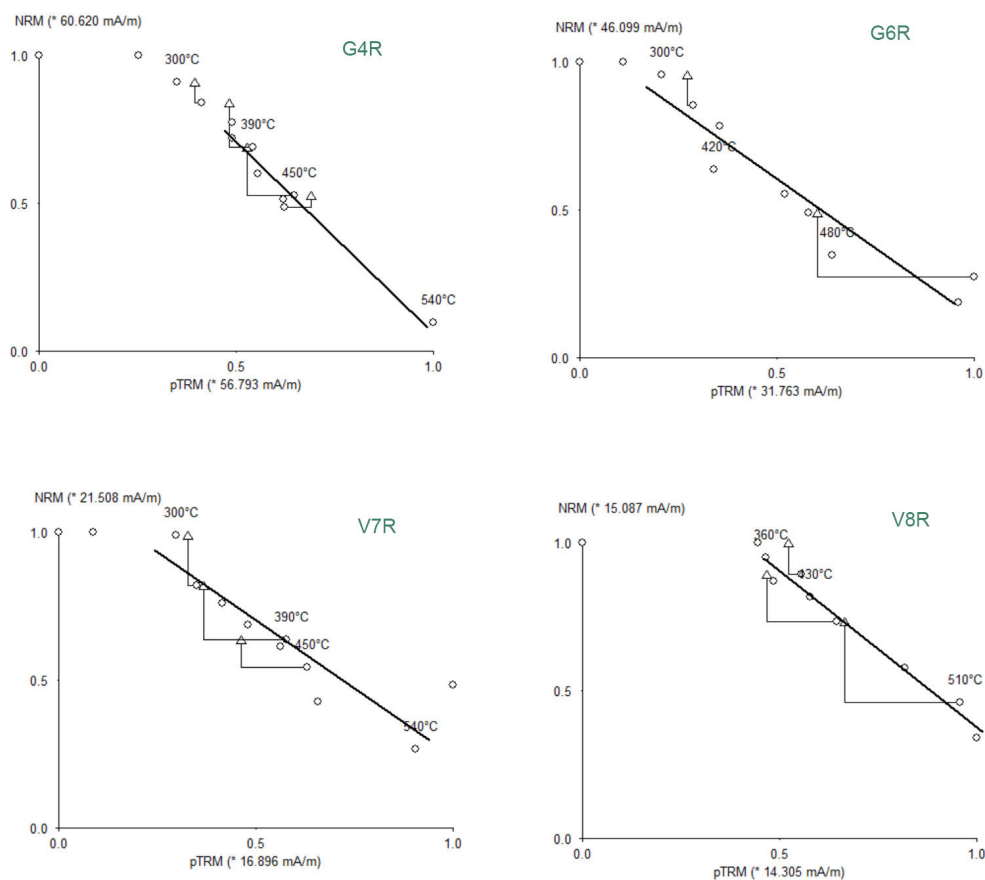


Figura 5-14: Diagramas de Arai Ramos.

Con los datos del diagrama de Arai se elaboraron los cuadros 5-2 para Mimbres y 5-3 para Ramos, donde podemos observar los parámetros de calidad n , f , g y q correspondientes a cada muestra, así como su valor VADM calculado. También en la última columna mostramos el intervalo de edad obtenido con el programa de Pavón-Carrasco(2011) con la curva SCHA.DIF.14K .

Cuadro 5-2: Se resumen los resultados de las cerámicas tipo Mimbres.

| Nombre | Sitio | H [μT] | n | f% | g | q | DRAT | VADM [Am^2] | Edad (d.C.) |
|------------|---------------|-------------------|----|----|------|-------|------|------------------|-------------|
| CH331 | CH33 | 40.90 \pm 10.41 | 10 | 79 | 0.82 | 6.35 | 2.6 | 8.98 \pm 1.12 | [655 753] |
| CH3A3 | CH3A | 40.65 \pm 2.17 | 8 | 74 | 0.63 | 9.23 | 2.8 | 7.67 \pm 1.13 | [862 937] |
| Promedio 1 | | 40.77 \pm 0.12 | | | | | | 7.95 \pm 1.16 | [657 748] |
| CH3A2 | CH3A | 56.09 \pm 18.92 | 9 | 83 | 0.76 | 3.6 | - | 10.93 \pm 1.13 | [920 1030] |
| G1M | Galeana | 57.25 \pm 2.12 | 7 | 71 | 0.73 | 10.25 | 5.25 | 11.20 \pm 1.17 | [972 1006] |
| Promedio 2 | | 56.67 \pm 0.58 | | | | | | 10.93 \pm 1.13 | [964 998] |
| V2M | Villa Ahumada | 71.46 \pm 5.74 | 9 | 91 | 0.73 | 8.3 | 1.2 | 13.49 \pm 1.15 | [1295 1554] |

Cuadro 5-3: Se resumen los resultados de las cerámicas tipo Ramos.

| Nombre | Sitio | H [μT] | n | f% | g | q | DRAT | VADM [Am^2] | Edad (d.C.) |
|----------|---------------|------------------|----|----|------|------|------|------------------|-------------|
| G4R | Galeana | 55.15 \pm 4.5 | 8 | 49 | 0.51 | 3.1 | 7.9 | 10.79 \pm 1.17 | [1194 1342] |
| G6R | Galeana | 54.46 \pm 6.77 | 9 | 69 | 0.84 | 4.6 | 4.9 | 10.65 \pm 1.07 | [1196 1326] |
| V7R | Villa Ahumada | 46.92 \pm 4.12 | 10 | 55 | .81 | 3.61 | 10.6 | 9.92 \pm 1.15 | [1200 1309] |
| V8R | Villa Ahumada | 44.96 \pm 4.18 | 7 | 55 | 0.73 | 4 | 4 | 8.70 \pm 1.15 | [1227 1269] |
| Promedio | Galeana | 54.80 \pm 0.34 | | | | | | 10.72 \pm 0.16 | [1194 1336] |
| Promedio | Villa Ahumada | 45.94 \pm 0.98 | | | | | | 8.93 \pm 0.15 | [1227 1269] |

Capítulo 6

Discusión

Se analizaron 40 muestras a las cuales se les realizaron experimentos de magnetismo de rocas, esto para identificar los minerales portadores de la remanencia y elegir cuales servirían para el proceso de arqueointensidad.

En los experimentos de susceptibilidad contra temperatura la mayoría de los especímenes mostraron reversibilidad. De las muestras reversibles la mayoría muestra dos puntos de Curie entre los 200-300°C grados y otro a los 500-600°C que podrían representar una mezcla de titanomagnetitas pobres y ricas en Titanio. En general los especímenes no reversibles mostraron un aumento en la susceptibilidad en el enfriamiento.

El diagrama de Day señala que la mayoría de los especímenes se encuentran en la región PSD, con una tendencia SD. Los especímenes siguen la tendencia hiperbólica de mezclas SD+MD (Dunlop 2002). Observamos que las cerámicas Mimbres y Ramos están distribuidas a lo largo de dos diferentes curvas de Mezcla SD+MD (figura 5-12).

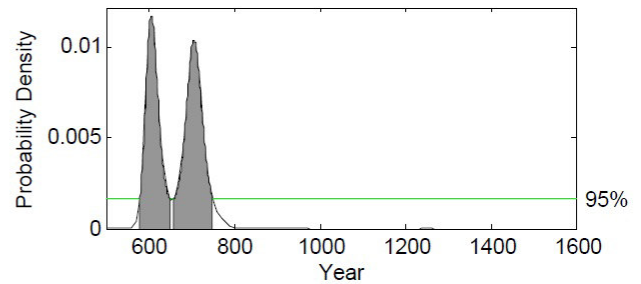
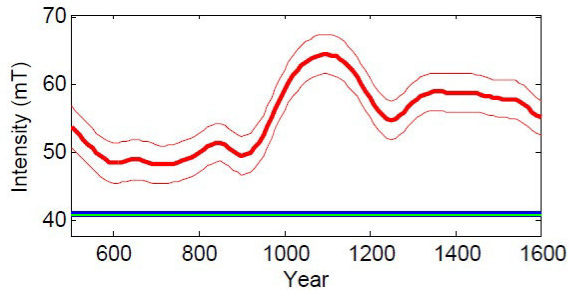
Gracias a los experimentos de propiedades magnéticas de las 40 cerámicas analizadas, se seleccionaron 25 para el cálculo por arqueointensidad. De estas 25 cerámicas únicamente 9 cumplieron con los coeficientes de calidad de Coe.

De las cerámicas tipo Mimbres se obtuvieron sólo 5 resultados satisfactorios. El valor del parámetro q está entre 3.6 y 10.25. La fracción f tiene valores entre 71 y 91 %.

De las cinco cerámicas de Mimbres hay dos grupos de valores muy parecidos. El grupo

1 se conforma por la cerámica CH331 $40.90 \pm 10.41 \mu T$ y la CH3A2 $40.65 \pm 2.17 \mu T$, su intensidad promedio resultó de $40.77 \pm 0.12 \mu T$ y su VADM de $7.95 \pm 1.16 \times 10^{22}$. El grupo 2 está formado por las cerámicas CH3A2 con intensidad de $56.09 \pm 18.92 \mu T$ y G1M $57.25 \pm 2.12 \mu T$, la intensidad promedio es $56.67 \pm 0.58 \mu T$ y su VADM promedio de $10.93 \pm 1.13 \times 10^{22}$ (Cuadro 5-2).

Promedio 1.



Promedio 2.

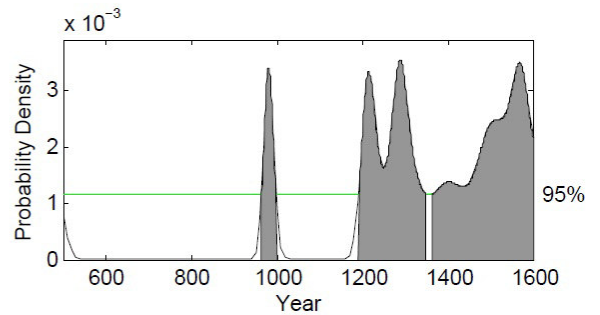
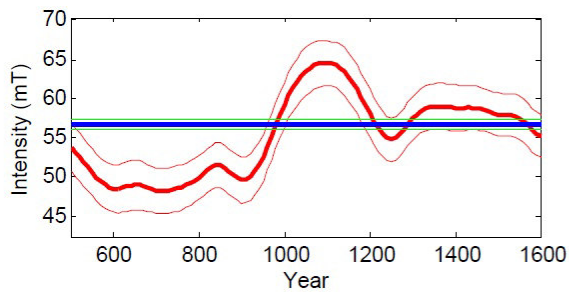


Figura 6-1: Se muestran las gráficas de variación secular vs intensidad, y las densidades de probabilidad los Promedios 1 y 2 de Mimbres, utilizando el modelo SCHA.DIF.14K.

Las cerámicas Mimbres a pesar de tener buenos factores de calidad no se distingue un valor único de intensidad que era lo esperado debido a que su estilo correspondía a un mismo periodo. La principal razón que podría explicar esta variabilidad era que no había una certeza del lugar donde fueron cocidas por lo tanto comparé las intensidades usando las coordenadas de donde fueron encontradas contra las coordenadas de Valle de Mimbres y como podemos notar en el cuadro 6-1 no hubo variación. Así que un transporte de Mimbres a Paquimé no es significativo ni para el VADM ni en la datación. Aún así estos dos grupos de intensidades

Cuadro 6-1: Comparación de dataciones, usando las coordenadas de Mimbres y las coordenadas del sitio donde fueron cocidas, con el modelo SCHA.DIF.14K

| Nombre | COORDENADAS | Latitud | Longitud | Edad |
|--------|-------------|---------|-------------|----------------|
| CH331 | Mimbres | 32.2586 | -107.6294 | [655AD 753AD] |
| | CH331 | 31.3916 | -107.013658 | [656AD 747AD] |
| CH3A3 | Mimbres | 32.2586 | -107.6294 | [862AD 937AD] |
| | CH3A | 31.3755 | -106.9960 | [861AD 936AD] |
| CH3A2 | Mimbres | 32.2586 | -107.62944 | [920AD 1030AD] |
| | CH3A | 31.3755 | -106.99609 | [923AD 1039AD] |
| G1M | Mimbres | 32.2586 | -107.62944 | [970AD 1001AD] |
| | Galeana | 30.1142 | -107.6444 | [972AD 1006AD] |

parecidas podría deberse a varias causas como: posibles recalentamientos, o que fueron cocidas en hornos de diferentes épocas o simplemente el registro de una remanencia secundaria.

Los valores de intensidad se compararon con los modelos SCHA.DIF.14k, y ARCH3K.1. Con el modelo ARCH3K.1 con una ventana de tiempo entre 500 a 1600 a.C. no hubo intersecciones en ninguno de los promedios. Utilizando el modelo SCHA.DIF.14K con la misma ventana temporal, el promedio 1 no tuvo intersección con la curva de variación secular y el promedio 2 tuvo dos intervalos obtenidos: [964 998] y [1192 1349] los cuales no coinciden con su contexto arqueológico que es de 1000 a 1100 años d.C. Esto también podría deberse a que estamos utilizando un modelo Global, recalando la importancia de tener modelos regionales para poder hacer dataciones precisas.

En el caso de las cerámicas tipo Ramos se obtuvieron sólo 4 resultados satisfactorios según los factores de calidad de Coe: Dos resultados de la zona de Galeana y dos de Villa Ahumada. Los dos resultados de Galeana son parecidos entre sí, es decir el espécimen G4R con una arqueointensidad de $55.15 \pm 4.5 \mu T$ y el G6R $54.46 \pm 6.77 \mu T$ En el caso de de Villa Ahumada tenemos el espécimen V7R con una intensidad de $46.62 \pm 4.12 \mu T$ y el V8R con $44.6944.69 \pm 4.18 \mu T$. Arqueológicamente esto podría significar subgrupos en las mismas cerámicas, o que fueron cocidas en diferentes épocas.

El parámetro de fracción f tiene valores entre 49 y 69% y el parámetro q se encuentra entre 3.1 y 4.6. El parámetro de calidad q tiene valores inferiores comparándolos con los resultados

de Mimbres que están entre 3.6 y 10.25, señalando que el ajuste de recta de las cerámicas de Mimbres es de mejor calidad. Lo cual se ve reflejado en los Diagramas de Arai de las figuras 5-13 y 5-14.

El promedio de Galeana resultó de $54.80 \pm 0.34 \mu T$ y el de Villa Ahumada es de $45.94 \pm 0.98 \mu T$. Sus VADMs calculados fueron de $10.72 \pm 0.16 \times 10^{22}$ en el caso de Galeana y de $8.93 \pm 0.15 \times 10^{22}$ en el caso de Villa Ahumada. Los valores de intensidad se compararon con los modelos SCHA.DIF.14K y ARCH3K.1. Con el modelo SCHA.DIF.14K el intervalo que resultó del promedio de Galeana fue de [1194 1336] y con el promedio de Villa Ahumada resultó de [1227 1269] con 2σ de confiabilidad, estos dos intervalos si concuerdan con el contexto arqueológico del tipo cerámico que es de [1200 1450], en la figura 6-2 se muestra la curva de variación secular su intersección y la densidad de probabilidad de estos dos promedios.

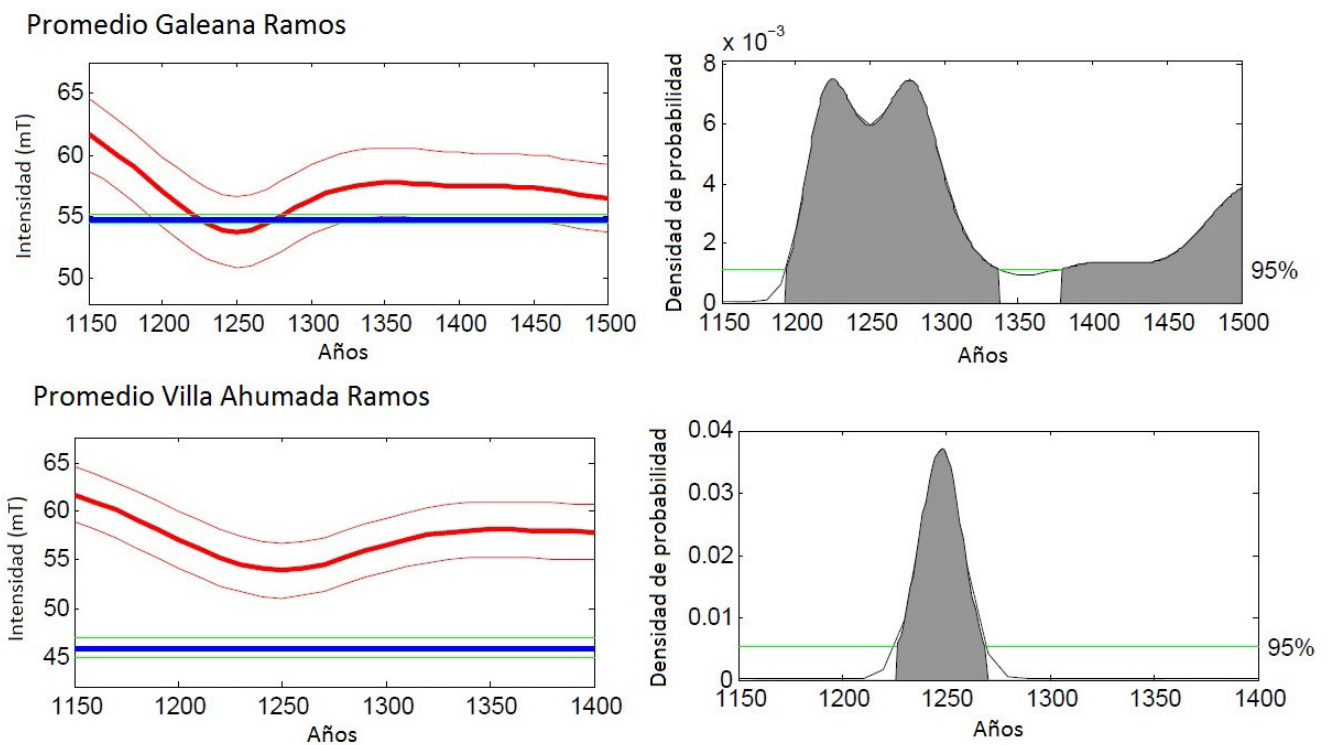


Figura 6-2: Se muestran las gráficas de variación secular vs intensidad, y las densidades de probabilidad para los promedios de Galeana-Ramos y Villa Ahumada-Ramos.

Es interesante mencionar que los valores de arqueointensidad de Galeana sobre todo el de

la cerámica G6R tiene una coincidencia con los dos modelos a los que se sometieron todas las arqueointensidades (SCHA.DIF.14K y ARCH3K.1), el valor de la arqueointensidad de la cerámica es $54.46 \pm 6.77 \mu T$ y su VADM es de 10.65 ± 1.07 , su intervalo de edades en los dos modelos es similar y es de [1196 1326]. En la figura 6-3 se observan su diagrama vectorial, su gráfica de susceptibilidad contra temperatura y su diagrama de Arai, podemos señalar que ni sus propiedades ni su valor de calidad q de calidad es el mejor, por lo tanto es un punto importante que podría poner en duda nuestro resultado satisfactorio.

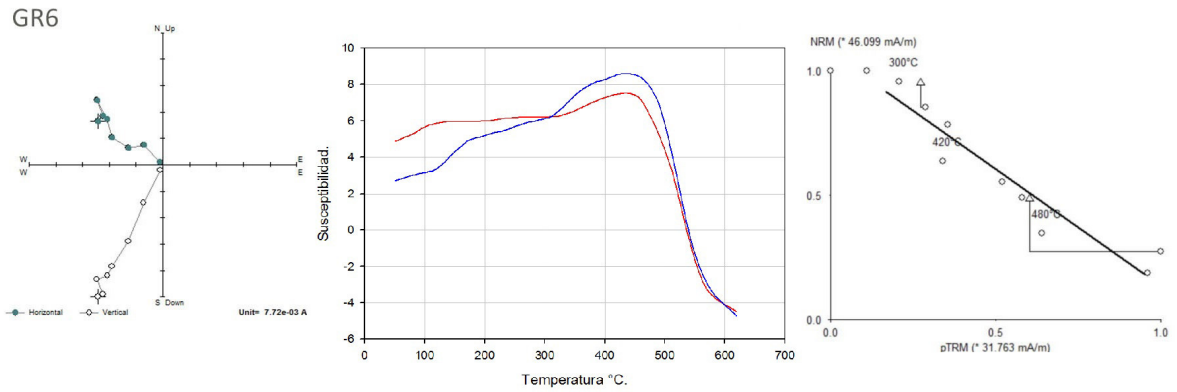


Figura 6-3: Algunas propiedades magnéticas y diagram de Arai de la muestra G6R

Los VADM calculados se compararon con la base de datos de GEOMAGIA usando datos arqueomagnéticos y volcánicos restringiéndolos a la zona de Nuevo México. Se puede apreciar en la gráfica de la figura 6-4 (VADM vs. edad) que el dato promedio de Ramos-Galeana es muy parecido a los valores de Nuevo México, en cambio los datos Promedio de Mimbres no coinciden con los de Nuevo México sobre todo el Promedio 1. También se muestran los datos de México sólo para resaltar la escasez de estudios arqueomagnéticos, y además estos concentran en el área Arqueológica de Mesoamerica.

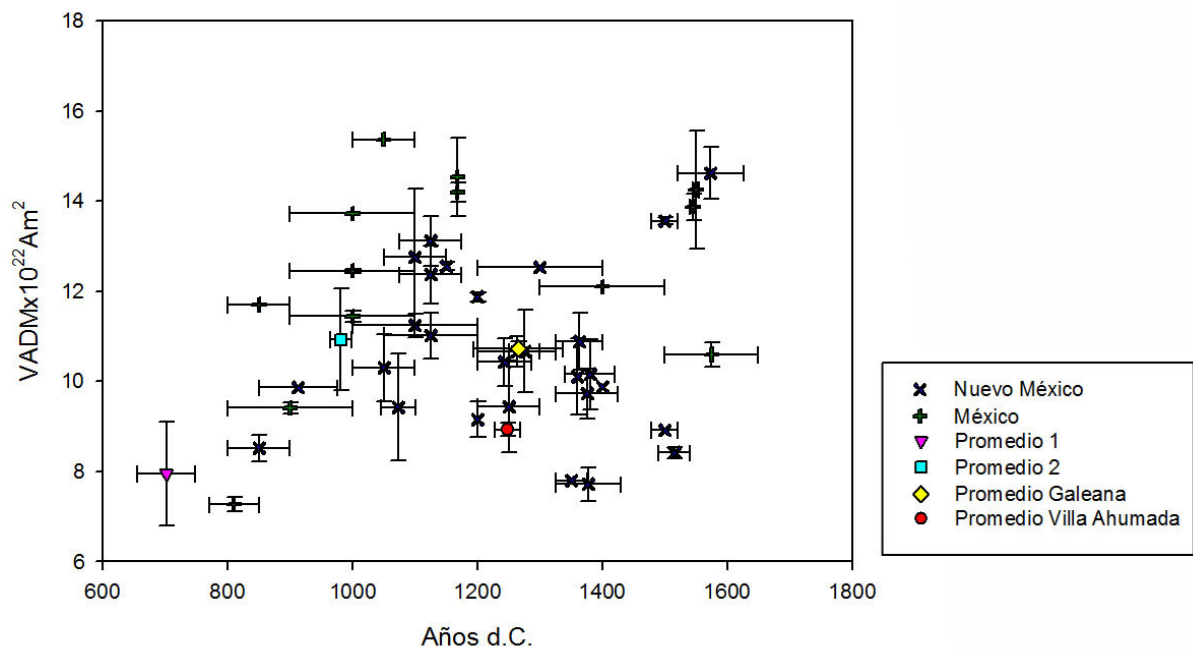


Figura 6-4: VADM vs Años. Utilizando la base de datos de GEOMAGIA.

Capítulo 7

Conclusiones

Se analizaron 40 artefactos de dos tipos cerámicos, 15 Mimbres y 25 cerámicas del tipo Ramos.

De las 11 cerámicas Mimbres y 14 cerámicas del tipo Ramos analizadas se pudieron obtener 5 arqueointensidades de Mimbres y 4 de Ramos con una alta confiabilidad, tras cumplir los factores de calidad de Coe.

Al ser cerámicas provenientes de distintas zonas y de dos periodos diferentes los comportamientos de propiedades magnéticas fueron diversos pero en general la mineralogía se caracteriza por ser titanomagnetitas de bajo y alto contenido en titanio y mezclas entre éstas. Con los parámetros de histéresis se identifica una mezcla predominante de dominios PSD con tendencia a SD. La cerámicas Mimbres y Ramos están distribuidas a lo largo de dos diferentes curvas de Mezcla SD+MD.

En el caso de las cerámicas de Mimbres se calcularon dos promedios la intensidad promedio 1 es de $40.77 \pm 0.12 \mu T$ y el promedio 2 es $56.67 \pm 0.58 \mu T$. Al ingresar los valores de intensidad en el programa de Pavón y Carrasco y utilizando el modelo SCHA.DIF.14K sólo el promedio 2 obtuvo coincidencias, pero estas no coincidieron con su contexto Arqueológico. Al tener incertidumbre del lugar donde fueron cocidas, se hizo una comparación utilizando dos coordenadas diferentes, una en el lugar donde supuestamente fueron cocidas según su estilo y la otra donde fueron recolectadas, las dos dentro de la región Mogollón, los intervalos de edad

edad arrojados por el programa de Pavón y Carrasco no difieren y son prácticamente iguales como se observó en el cuadro 6-1. Por lo tanto un transporte dentro de esta región no es significativo tanto en la datación como en su VADM. Las diferencias entre los resultados y las fechas que le corresponden a su contexto arqueológico podrían deberse a posibles recalentamientos, otra edad de cocimiento o simplemente el registro de una remanencia secundaria.

En el caso de Ramos sólo se tienen cuatro resultados satisfactorios según los factores de calidad, dos pertenecientes a Galeana y dos a Villa Ahumada. El promedio de arqueointensidad de Galeana es de $54.80 \pm 0.34 \mu T$ y su VADM $10.72 \pm 0.16 \times 10^{22}$ estos resultados concuerdan con los datos de Nuevo México de la base de datos de GEOMAGIA y su datación con su contexto arqueológico. A pesar de eso son pocos datos para dar una conclusión definitiva acerca de la arqueointensidad.

En ambos tipos cerámicos se necesitan más muestras para poder tener intensidades de alta confiabilidad.

Para poder hacer dataciones de calidad se necesitan hacer curvas regionales y por lo tanto se necesitan mucho más datos paleomagnéticos y arqueomagnéticos.

La importancia de este trabajo radica en que es la primera aportación arqueomagnética del Noroeste de México.

Bibliografía

- [1] ALVA-VALDIVIA, L., MORALES, J., GOGUITCHAICHVILI, A., DE HATCH, M.P., HERNANDEZ-BERNAL, M., Y MARIANO-MATÍAS, F. Absolute geomagnetic intensity data from preclassic Guatemalan pottery. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **180**(1):41–51 (2010)
- [2] BUTLER, R.F. *Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes* (1998)
- [3] CEJA, M.R., GOGUITCHAICHVILI, A., MORALES, J., OSTROOUMOV, M., MANZANILLA, L.R., REYES, B.A., Y URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. Integrated archeomagnetic and micro-Raman spectroscopy study of pre-Columbian ceramics from the Mesoamerican formative village of Cuanalan, Teotihuacan Valley, Mexico. *Journal of Geophysical Research* **114**(B4):B04103 (2009)
- [4] COE, R.S. The determination of paleo-intensities of the Earth's magnetic field with emphasis on mechanisms which could cause non-ideal behavior in Thellier's method. *Journal of geomagnetism and geoelectricity* **19**(3):157–179 (1967)
- [5] COE, R.S., GROMMÉ, S., Y MANKINEN, E.A. Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **83**(B4):1740–1756 (1978)
- [6] CORNEJO, B.B. *Paquimé*. Fondo de Cultura Económica (2016)
- [7] DAY, R., FULLER, M., Y SCHMIDT, V. Hysteresis properties of titanomagnetites:

- grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and planetary interiors* **13**(4):260–267 (1977)
- [8] DI PESO, C.C. *Casas Grandes: a fallen trading center of the Gran Chichimeca*, tomo 1. Amerind Foundation (1974)
- [9] DUNLOP, D. Theory and application of the day plot. *Journal of Geophysical Research* **107** (2002)
- [10] FANJAT, G., CAMPS, P., VALDIVIA, L.A., SOUGRATI, M., CUEVAS-GARCIA, M., Y PERRIN, M. First archeointensity determinations on Maya incense burners from Palenque temples, Mexico: New data to constrain the Mesoamerica secular variation curve. *Earth and Planetary Science Letters* **363**:168–180 (2013)
- [11] HUNT, C.P., MOSKOWITZ, B.M., Y BANERJEE, S.K. Magnetic properties of rocks and minerals. *Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants* págs. 189–204 (1995)
- [12] LEBLANC, S.A. The Dating of Casas Grandes. *American Antiquity* **45**(4):799–806 (1980)
- [13] NAGATA, T. Secular variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years. *J. geophys. Res.* **68**:5277–5281 (1963)
- [14] NELSON, M.C. Y HEGMON, M. Abandonment is not as it seems: An approach to the relationship between site and regional abandonment. *American Antiquity* **66**(2):213–235 (2001)
- [15] NELSON, M.C. Y HEGMON, M. Abandonment is not as it seems: An approach to the relationship between site and regional abandonment. *American Antiquity* **66**(2):213–235 (2001)

- [16] PAVÓN-CARRASCO, F.J., RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, J., OSETE, M.L., Y TORTA, J.M. A Matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science* **38**(2):408–419 (2011)
- [17] PRÉVOT, M., MANKINEN, E.A., COE, R.S., Y GROMMÉ, C.S. The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition: 2. Field intensity variations and discussion of reversal models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **90**(B12):10417–10448 (1985)
- [18] SCHWARZ, E. Y VAUGHAN, D. Magnetic phase relations of pyrrhotite. *Journal of geomagnetism and geoelectricity* **24**(4):441–458 (1972)
- [19] SOLER ARECHALDE, A.M. *Investigaciones arqueomagnéticas en México, fundamentos. historia y futuro*. Monografías del Instituto de Geofísica (2006)
- [20] SOLER ARECHALDE, A.M. Arqueomagnetismo en México 1965-2013. *Latinmag Letters* **4**(4):14 (2004)
- [21] TARLING, D.H. *Palaeomagnetism: principles and applications in geology, geophysics and archaeology*. Springer Science & Business Media (1983)
- [22] TAUXE, L., MULLENDER, T., Y PICK, T. Potbellies, wasp-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **101**(B1):571–583 (1996)
- [23] TAUXE, L. *Essentials of paleomagnetism*. Univ of California Press (2010)
- [24] THELLIER, E. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Geophys.* **15**:285–376 (1959)