



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

VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD ARQUEOMAGNÉTICA DURANTE LOS ÚLTIMOS
DOS MIL AÑOS EN MICHOACÁN Y JALISCO.

TESIS
QUE PARA OBTENER POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA:
ANUAR GABRIEL TERÁN GUERRERO

TUTOR:
DR. AVTO GOGICHAISHVILI
Instituto de Geofísica, UNAM.
Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Ambiental

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DRA. ANA MARIA SOLER ARECHALDE.
Instituto de Geofísica, UNAM. Laboratorio de Paleomagnetismo
DR. JUAN JULIO MORALES CONTRERAS
Instituto de Geofísica, UNAM. Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Ambiental
DRA. BERTHA OLIVA AGUILAR REYES
Instituto de Geofísica, UNAM. Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Ambiental

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Mayo de 2017.



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.

DEDICATORIAS

A mi amada esposa y a mis queridos hijos, quienes me recordaron constantemente que la vida también está fuera del laboratorio, y siempre tuvieron a bien sacarme de mi estado de bulto medidor, con un amoroso gesto.

A la memoria de mi amada madre porque sin sus amorosas palabras y consejos no me habría sido posible iniciar y concluir esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Avto Gogitchaisvili quien, con su generosidad en todos los sentidos, ha sido una parte fundamental de mi formación académica y personal.

A mi comité tutor integrado por la Dra. Ana María Soler Arechalde, al Dr. Juan Julio Morales Contreras y a la Dra. Bertha Oliva Aguilar Reyes quienes con sus observaciones y sugerencias a lo largo de todo mi doctorado enriquecieron mi investigación y permitieron consolidarme como investigador.

A los sinodales: Dra. María Rodríguez Ceja, Dr. Efraín Cárdenas García, Dr. José Rosas Elguera, y Dr. Juan Rodrigo Esparza López quienes con sus comentarios y observaciones enriquecieron esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el proyecto CONACYT n.º 252149 y al programa UNAM-PAPIIT IN101717, por el apoyo financiero para la realización de esta investigación.

Al programa de Doctorado en Ciencias de la Tierra el cual a través del Instituto de Geofísica, patrocinó mi asistencia a congresos y por su apoyo en todos los sentidos para concluir este trabajo de investigación.

A mi familia en especial a mi hermana Anizul, quien siempre estuvo al pendiente de mis avances y me hizo muy buenas sugerencias.

A mis colegas y amigos del grupo de geomagnetismo de la unidad Michoacán, por su apoyo académico y personal.

Índice

1. Introducción.....	9
1.1 Objetivo general	
1.2 Objetivos particulares	
2. Geomagnetismo.....	14
2.1 Introducción	
2.2 Definiciones básicas	
2.3 Variación secular del Campo Magnético Terrestre	
3. Arqueomagnetismo.....	22
3.1 Introducción	
3.2 Magnetización remanente	
3.3 Técnicas de datación arqueomagnética	
3.4 Estudios arqueomagnéticos en Europa	
3.5 Estudios arqueomagnéticos en América y Mesoamérica	
4. Arqueointensidad.....	36
4.1 Introducción	
4.2 Técnicas para determinar la dirección del Campo Magnético Terrestre	
4.3 Técnicas para determinar la intensidad del Campo Magnético Terrestre	
4.4 Estudios de arqueointensidad en América	
4.4.1 Estudios de arqueointensidad en el Occidente de México	
5. Modelos de Variación Secular del Campo Magnético Terrestre.....	50
5.1 Introducción	
5.2 Curvas de Variación Secular	
5.2.1 Curvas regionales de variación paleo secular (aproximación clásica)	
5.3 Modelos de referencia del Campo Geomagnético	
5.3.1 Modelos regionales	
5.3.2 Modelos globales	

6. Los sitios de estudio.....	60
6.1 Introducción	
6.2 Estudios arqueológicos en Michoacán	
6.3 Arqueología de Las Lomas en la Cuenca de Zacapu	
6.3.1 Conjuntos funerarios en Las Lomas de Zacapu	
6.3.2 El conjunto de Loma Alta	
6.3.3 Secuencia de ocupación de Loma Alta	
6.3.4 Dataciones de carbono 14 disponibles para Loma Alta.	
6.3.5 Las muestras y su preparación	
6.3.6. Análisis de Magnetismo de Rocas	
6.3.7 Determinaciones de arqueointensidades	
7. Guachimontones de Teuchitlán.....	88
7.1 Arqueología y contexto de la muestras	
7.2 Los Bajareques	
7.3 Dataciones por carbono 14	
7.4 Propiedades magnéticas de los Bajareques	
7.5 Las muestras y su preparación	
7.6 Determinación de arqueointensidades	
7.7 Los tiestos y su preparación	
7.8 Dataciones por carbono 14	
7.9 Análisis de Magnetismo de las Rocas	
7.10 Determinaciones de arqueointensidades	
8. Palacio de Ocomo.....	116
8.1 Contexto arqueológico de los tiestos	
8.2 Preparación de muestras	
8.3 Dataciones por carbono 14	
8.4 Análisis de Magnetismo de Rocas	
8.5 Determinaciones de arqueointensidades	
9. Conclusiones.....	139
10. Referencias Bibliográficas.....	146

Resumen

El estudio del campo magnético terrestre ha sido un hito en el conocimiento de nuestro planeta, durante miles de años ha atraído el interés de la humanidad, en la actualidad se han desarrollado técnicas que permiten rescatar las características principales de éste con una excelente calidad, además el conocimiento detallado y la acumulación de datos permite desarrollar técnicas que se han incubado de manera conjunta entre disciplinas que se podrían pensar como ajenas para proporcionar temporalidades a materiales antrópicos.

Cuando las estructuras o materiales antrópicos fabricados con arcillas que contienen una porción de minerales ferrimagnéticos, son horneados o quemados, se genera un proceso de magnetización llamada termorremanente, esta magnetización es proporcional a la intensidad e igual a la dirección que tenía el campo geomagnético al momento de su cocción o quema y de su enfriamiento.

El momento en el cual cierto material antrópico adquirió su remanencia, puede ser determinado comparando sus parámetros magnéticos con aquellos registrados a partir de otros materiales ya estudiados, para los cuales además de las determinaciones de parámetros magnéticos, se tienen correlaciones con dataciones que provengan de la misma región geográfica. Este proceso se logra a través de un conjunto de datos, a los cuales se les conoce como curva maestra o curva de referencia, las cuales son construidas con los tres elementos vectoriales con los que nos servimos para describir al campo magnético terrestre, los cuales son declinación, inclinación e intensidad. En lugares donde las variaciones del campo magnético del pasado se conocen bien, y por lo tanto las curvas están bien establecidas, las dataciones arqueomagnéticas pueden ser tan precisas como las obtenidas con métodos radiométricos.

México es un país rico en sitios arqueológicos pero los estudios arqueomagnéticos son todavía escasos. Existe una carencia generalizada de muestras *in situ* con el registro de una magnetización termorremanente, lo cual es un requerimiento para obtener las direcciones de campo magnético antiguo, pero los estudios de arqueointensidad tienen la particularidad de que no se requiere material orientado para su realización, siendo entonces útiles para tal efecto los

materiales antropogénicos que han sido sometidos, por horneado o quema, a temperaturas típicas de 600-700[°C].

En ésta tesis se presentan los resultados de mediciones sistemáticas de arqueointensidad efectuadas en piezas de cerámica del conjunto funerario de Loma Alta, en el sitio arqueológico de Zacapu, en el estado de Michoacán, así como de un material correspondiente a un método constructivo denominado Bajareque, obtenido del sitio Arqueológico de Guachimontones de Teuchitlán en el estado de Jalisco, también se trabajó con tiestos provenientes de una estructura denominada círculo 6 del mismo sitio; del Sitio denominado Palacio de Ocomo se investigaron tiestos provenientes de un sitio monumental ubicado en el municipio de Etzatlán, en el estado de Jalisco.

Las fechas asociadas al material estudiado se asignaron utilizando otras dataciones disponibles, usualmente carbono 14, y la información arqueológica asociada a las muestras, es decir, estilo cerámico y estratigrafía. La temporalidad disponible para el material proveniente de Loma Alta en el sitio de Zacapu está comprendida en el intervalo [250 a.C. - 550 d. C.], en tanto que las fechas asociadas al material obtenido de Guachimontones, se encuentra en el intervalo [387 a.C. - 109 d. C.]. Para tiestos pertenecientes al sitio Palacio de Ocomo, el intervalo del tiempo conocido es de [450 d.C.-900 d.C.]

Se obtuvieron curvas continuas de susceptibilidad contra temperatura, que indican que en la mayoría de las muestras estudiadas, los portadores de la magnetización son titanomagnetitas pobres en titanio. Otros casos mostraron dos fases ferrimagnéticas, cuya temperatura de Curie es compatible con titanomagnetitas tanto pobres como ricas en titanio. En todos los casos de éxito en el procedimiento de laboratorio, se comprobó que los minerales magnéticos son titanomagnetitas pobres en titanio, además durante el experimento se realizaron chequeos para verificar la estabilidad termomagnética de las muestras.

Los experimentos de arqueointensidad se llevaron a cabo en 51 fragmentos de los cuales se obtuvieron 306 especímenes analizados para determinar la intensidad absoluta. Los efectos de la anisotropía de magnetización termorremanente y de la tasa de enfriamiento sobre la adquisición de la intensidad se estudiaron en estas muestras, generando factores de corrección, que permitieron disminuir las incertidumbres asociadas a las mediciones.

Los resultados obtenidos contribuyen a conocer las variaciones locales del campo magnético terrestre en Mesoamérica, y más específicamente en el occidente mexicano.

Las determinaciones de la intensidad absoluta de campo magnético se llevaron a cabo con el protocolo de Thellier y Thellier Modificado por Coe, también conocido como protocolo de Thellier-Coe, en el cual se calientan las muestras en intervalos ascendentes de temperatura, con y sin campo magnético aplicado en laboratorio. Con el experimento de medición continua de la susceptibilidad con la variación de la temperatura se caracterizaron las muestras para conocer el mineral representativo, y así tener certeza de que el protocolo que se aplicó fue efectivo en muestras que cumplieren con las condiciones necesarias para rescatar la magnetización original y que no se está alterando la muestra a tal grado de producir datos inexactos o no confiables.

Con la instrumentación disponible en los laboratorios donde se trabajó, es posible no solo determinar la intensidad de la magnetización primigenia, sino que además se obtiene con una excelente calidad técnica, que permite aportar datos de mejor calidad a las curvas regionales de variación secular.

En esta investigación fue posible determinar la intensidad absoluta de 43 muestras provenientes de 3 sitios ubicados en Michoacán y Jalisco, lo cual representa un 84% de efectividad (del total de muestras estudiadas) para la determinación de los valores de intensidad absoluta.

La buena calidad de los datos obtenidos (control estricto de temporalidad, contexto y una excelente técnica experimental) permite su incorporación a la curva de variación secular, pero no sólo como herramientas de posible datación de material arqueológico, sino también para comprender mejor el comportamiento del campo geomagnético y su relación con aspectos de la dinámica planetaria y de la dinámica humana de los sitios con los que se trabajó, al aportar datos como los obtenidos en este trabajo de investigación se fortalece la plataforma del conocimiento, lo cual permite que sean usados sin reserva para investigaciones futuras.

1. Introducción

Las piezas arqueológicas que fueron fabricadas empleando arcillas que contienen minerales magnéticos, así como estructuras arquitectónicas que fueron cocidas, quemadas u horneadas, al enfriarse adquieren remanencia térmica magnética, la cual es proporcional a la intensidad e igual dirección que tenía el campo geomagnético al momento en el cual la temperatura de cocido, quemado u horneado, sobrepasó la temperatura de Curie de dichos minerales.

El momento en el cual una pieza arqueológica de cerámica adquirió su remanencia, o la estructura arquitectónica fue calentada típicamente por arriba de los 600 grados centígrados, puede ser determinado comparando sus parámetros magnéticos con aquellos registrados a partir de otros materiales ya datados, que provengan de la misma región geográfica. Este proceso se logra a través de un conjunto de datos, a los cuales se les conoce como curva maestra o curva de referencia y los modelos que de ellas derivan, los cuales son construidos con los tres elementos vectoriales con los que nos servimos para describir al campo magnético terrestre (declinación, inclinación e intensidad). En lugares donde las variaciones del campo magnético del pasado se conocen bien, y por lo tanto las curvas y sus modelos están bien establecidas, las dataciones arqueomagnéticas pueden ser tan precisas o incluso mejores que aquellas obtenidas con métodos radiométricos.

La posibilidad de proporcionar asignaciones cronológicas a eventos culturales del pasado es fundamental. En este sentido, el estudio arqueomagnético desarrollado en la presente investigación es un aporte significativo a nivel metodológico por los contextos donde se pretende aplicar y efectivo para solucionar carencias cronológicas en la investigación arqueológica.

Desde el punto de vista arqueomagnético y geomagnético, los resultados derivados de este proyecto supondrán una contribución importante al conocimiento de la variación secular del campo magnético terrestre en México y Mesoamérica. Finalmente, son extraordinariamente escasas las determinaciones de arqueointensidad. Este trabajo puede representar un gran avance en este campo.

La investigación pionera en arqueomagnetismo fue llevada a cabo por Folgheraiter (1899) quien al estudiar el comportamiento del magnetismo presente en cerámicas antiguas estableció

que se podría llegar a alguna conclusión de la intensidad de campo terrestre antigua a través de recalentamientos controlados en laboratorio, y la comparación de la magnetización adquirida en el pasado con la adquirida en laboratorio, cuantitativamente la idea de Folgheraiter queda expresada como: $\frac{H_{ant}}{H_{lab}} = \frac{NRM}{TRM}$. Además Folgheraiter estableció tres condiciones necesarias para el estudio del magnetismo presente en cerámicas antiguas, las cuales se enlistan a continuación:

- 1) El módulo del vector asociado a la magnetización natural remanente o NRM por sus siglas en inglés debe ser proporcional a la intensidad del campo aplicado (campo magnético terrestre), lo cual es válido para campos débiles como el campo magnético terrestre.
- 2) La componente de NRM correspondiente al paso dado debe ser totalmente remplazado por el TRM del laboratorio, no solo superponerse.
- 3) Los minerales magnéticos deben prevalecer desde el momento en que se adquirió la NRM primaria, i. e., deben permanecer inalterados en los calentamientos subsecuentes. Esta última condición es la más difícil de asegurar, pues no se puede asegurar que no se produzcan alteraciones debido a los calentamientos aplicados.

Hacia 1932 Johann Koenigsberger estableció las propiedades experimentales de la magnetización termorremanente (TRM por sus siglas en inglés) e hizo una serie de observaciones muy cuidadosas en los pasos de re-magnetización térmica en rocas ígneas y metamórficas. Al trabajar con rocas y no con cerámicas antiguas en 1938 resumió lo que se sabía del cambio en la mineralogía magnética cuando un material es sometido a recalentamientos sucesivos, el magnetismo asociado a cambios en el tamaño de grano y textura, así como el magnetismo asociado a las alteraciones en la química de los minerales. Prácticamente todas las rocas con las que trabajó, alteraron su mineralogía magnética al ser recalentadas, comprometiendo los resultados en la determinación del campo magnético antiguo, sin embargo observó el potencial de esta metodología como una herramienta de datación.

Paralelamente Émile Thellier comenzó con el diseño y desarrollo de magnetómetros (1932, 1935, 1938), de los cuales se sirvió para perfeccionar la metodología de paleointensidad

(metodología actualmente usada), aunque debido a lo complicado del comportamiento de las rocas con las que trabajó se fijó más en las arcillas cocidas, pues es más sencillo reproducir en laboratorio las condiciones de cocción de las arcillas que las de las rocas. En 1959 Thellier y Thellier publican el artículo en el cual se describe el protocolo que les dio el mote de los padres del arqueomagnetismo moderno (Dunlop, 2011).

Aunque en México existen muchos sitios arqueológicos, los estudios arqueomagnéticos son todavía escasos. Existe una carencia generalizada de muestras halladas *in situ* con el registro de una magnetización termorremanente (lo cual es un requisito indispensable para los estudios de determinación de direcciones arqueomagnéticas), sin embargo los estudios de arqueointensidad tienen la particularidad de que no se requiere material orientado para su realización, siendo entonces útiles para tal efecto las cerámicas, hornos y bajareques colapsados, tabiques, tejas, por mencionar algunos.

En ésta tesis se presentan los resultados de mediciones de arqueointensidad efectuadas en tiestos y de un material conocido como bajareque de tres sitios arqueológicos situados en los estados de Michoacán y Jalisco. Dichos sitios son: el conjunto funerario de “Loma Alta” en el municipio de Zacapu, en Michoacán, y del estado de Jalisco los recintos conocidos como Palacio de Ocomo, municipio de Etzatlán, y el sitio arqueológico de Guachimontones, municipio de Teuchitlán, ambos en el estado de Jalisco.

Los intervalos de tiempo asociados al material se asignaron utilizando dataciones por carbono catorce de investigaciones previas, o expresas para proyectos en los que se está colaborando. La temporalidad disponible para el material proveniente de “Loma Alta” en el sitio de Zacapu está comprendida en el intervalo [100 a.C., 600 d. C.], obtenidas de C. Arnauld et al., 1993. Las fechas asociadas al material conocido como “Bajareque”, obtenido de Guachimontones, se encuentra en el intervalo [56 d.C., 380 d. C.], obtenidas de Weigand, 2008. Para este mismo sitio pero para el caso de los tiestos que provienen del círculo 6 “Proyecto Teuchitlán” el intervalo obtenido es de [164 a.C. – 206 d. C.], también obtenido de Weigand, 2008. Para los tiestos cerámicos provenientes del sitio arqueológico “Palacio de Ocomo”, Etzatlán, Jalisco, tienen el intervalo de tiempo asociado [56 d.C., 380 d. C.] obtenidas de datación

hecha por BETA ANALYTIC INC., con códigos Beta – 373002, Beta – 373003, , Beta – 373004
Beta – 373002 Beta – 373006

Se obtuvieron curvas continuas de susceptibilidad contra temperatura, que indican que en algunas muestras los portadores de la magnetización son titanomagnetitas pobres en titanio. Otros casos mostraron dos fases ferrimagnéticas, cuya temperatura de Curie es compatible con titanomagnetitas tanto pobres como ricas en titanio.

Los experimentos para determinar la arqueointensidad se realizaron en 47 muestras de tiestos de las cuales se obtuvieron 282 especímenes y 8 muestras de Bajareque de donde se obtuvieron 48 especímenes que fueron analizados para la determinación de arqueointensidad empleando la metodología desarrollada por Thellier (1959) y modificada por Coe (1967). Los efectos de la anisotropía de magnetización termorremanente y de la tasa de enfriamiento sobre la adquisición de la intensidad de TRM se estudiaron en estas muestras, generando factores para corregir los valores de arqueointensidad.

Los resultados obtenidos contribuyen a conocer las variaciones locales del campo magnético terrestre en Mesoamérica, y más específicamente en el occidente mexicano.

1.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es contribuir al conocimiento del campo magnético en los últimos dos milenios en México. Si bien en los últimos años se ha hecho un esfuerzo importante por aportar datos arqueomagnéticos para definir una curva de variación secular para Mesoamérica, aún es preciso abarcar determinadas áreas geográficas, y sobre todo intervalos temporales precisos.

Los objetivos específicos son:

- a) Mejorar el conocimiento de la variación secular del campo magnético reciente,
- b) Realizar nuevas aportaciones cronológicas de interés arqueológico

2. Geomagnetismo

2.1 Introducción

El campo magnético terrestre se genera en el núcleo externo líquido por medio del proceso de dinamo auto-excitado. Las corrientes eléctricas que fluyen en este medio viscoso de forma lenta generan el campo magnético. Además de las fuentes del campo magnético terrestre generado en el núcleo, el campo magnético observado en la superficie terrestre tiene origen en la corteza así como en la ionosfera y la magnetosfera. El campo geomagnético varía en rango de escalas y actualmente se describen estas variaciones, de baja a alta frecuencia, en dominios tanto espaciales como temporales (Campbell, 2003).

Una de las disciplinas más antiguas en la geofísica ha sido la medición y descripción del campo geomagnético así como sus variaciones espaciales y temporales. Sin embargo, nuestra habilidad para describir el campo excede por mucho nuestra capacidad para entender su origen. Todas las teorías posibles involucran la generación del campo geomagnético en el núcleo fluido externo de la Tierra mediante un mecanismo conocido como *dinamo magnetohidrodinámico*. Se han tratado de hacer modelos dinámicos pero estos no se han completado debido a que el origen magnetohidrodinámico del campo geomagnético todavía no está bien establecido.

2.2 Definiciones básicas

El *momento magnético dipolar* o simplemente *momento magnético*, \mathbf{M} , puede definirse como si nos refiriéramos a un par de cargas magnéticas (Figura 1.1a) o a una espira de corriente eléctrica (Figura 1.1b). Para un par de cargas magnéticas, la magnitud de la carga es m , y el vector de la distancia infinitesimal, \mathbf{l} , separa la carga positiva de la negativa. El momento magnético, \mathbf{M} , es

$$\mathbf{M} = m \mathbf{l} \quad (1.1)$$

Para una espira con área A que tiene una corriente I , el momento magnético es

$$\mathbf{M} = I A \mathbf{n} \quad (1.2)$$

Donde \mathbf{n} es el vector de longitud unitaria perpendicular al plano de una espira. La dirección propia de \mathbf{n} (y por lo tanto de \mathbf{M}) está dada por la regla de la mano derecha. La definición de momento magnético en una espira es básicamente la que se utiliza en todos los momentos magnéticos causados por corrientes eléctricas. Sin embargo, en algunas distancias, es conveniente imaginar momentos magnéticos producidos por cargas magnéticas.

Fuerza del campo magnético o campo magnético, \mathbf{H} , en una región está definida como la fuerza que experimenta una carga magnética positiva tomada de dicha región.

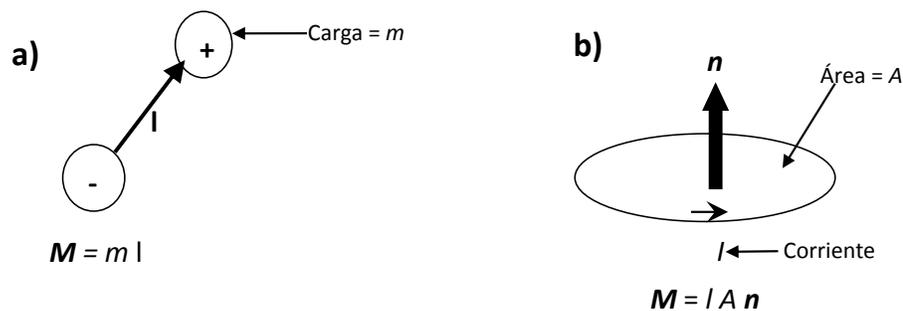


Figura 2.1 (a) Un dipolo magnético construido a partir de un par de cargas. La carga magnética de la carga positiva es m ; mientras que la de la carga negativa es $-m$; el vector distancia de la carga negativa a la carga positiva es \mathbf{l} . (b) Un dipolo magnético construido de una espira circular de corriente eléctrica. La corriente eléctrica en la espira circular es I ; el área de la espira es A ; el vector normal unitario \mathbf{n} es perpendicular al plano de una espira (Tomado de Butler, 2004)

El momento magnético que esté libre para rotar podrá alinearse con el campo magnético presente. La aguja de las brújulas tiene un momento magnético que se alinea con la componente horizontal del campo magnético, permitiendo determinar el azimut magnético.

La energía de alineación de los momentos magnéticos puede expresarse por medio del producto punto

$$E = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{H} = -MH\cos\theta \quad (1.3)$$

El signo negativo en esta expresión se requiere para obtener la configuración de la energía mínima cuando \mathbf{M} es paralelo a \mathbf{H} .

La intensidad magnética, o *magnetización*, \mathbf{J} , de un material es el momento magnético dipolar neto por unidad de volumen. Para calcular la magnetización de un volumen particular, la suma vectorial de los momentos magnéticos se divide entre el volumen:

$$\mathbf{J} = \frac{\sum_i \mathbf{M}_i}{\text{volumen}} \quad (1.4)$$

Donde \mathbf{M}_i es el momento magnético que lo constituye.

Existen básicamente dos tipos de magnetización: magnetización inducida y magnetización remanente. Cuando un material es expuesto a un campo magnético \mathbf{H} , adquiere una *magnetización inducida*, \mathbf{J}_i . Estas cantidades están relacionadas por medio de la susceptibilidad magnética, χ :

$$\mathbf{J}_i = \chi \mathbf{H} \quad (1.5)$$

De esta manera, la *susceptibilidad magnética*, χ , puede entenderse como la facilidad de una sustancia para magnetizarse. La expresión (1.5) utiliza un escalar para la susceptibilidad, implicando que \mathbf{J}_i es paralelo a \mathbf{H} . Sin embargo, algunos materiales exhiben *anisotropía magnética*, en donde \mathbf{J}_i no es paralela a \mathbf{H} . Para una sustancia anisotrópica, un campo magnético aplicado en una dirección x induce, por lo general, una magnetización no sólo en dirección x , sino también en direcciones y y z . Para sustancias anisotrópicas, la susceptibilidad magnética se expresa como un tensor, χ , donde se requiere una matriz de 3 x 3 para una descripción completa.

Además de la magnetización inducida resultado de la acción de los campos magnéticos presentes o aplicados, un material podía contener *magnetización remanente*, \mathbf{J}_r . Esta

magnetización remanente es un registro de los campos magnéticos pasados que han actuado sobre el material.

En paleomagnetismo, la dirección de un vector como el del campo geomagnético superficial usualmente se define por medio de los ángulos mostrados en la Figura 1.2. La componente vertical, H_v , del campo geomagnético superficial, \mathbf{H} , está definido como positivo hacia abajo y se expresa como

$$H_v = H \operatorname{sen} I \quad (1.6)$$

Donde H es la magnitud de \mathbf{H} e I es la inclinación de \mathbf{H} con respecto a la horizontal, y que va de -90° a $+90^\circ$ y está definido como positivo hacia abajo. La componente horizontal, \mathbf{H}_h , está dada por

$$H_h = H \cos I \quad (1.7)$$

Y las componentes Norte y Este son respectivamente,

$$H_N = H \cos I \cos D \quad (1.8)$$

$$H_E = H \cos I \operatorname{sen} D \quad (1.9)$$

Donde D es la *declinación*, el ángulo que se forma entre el Norte geográfico y la componente horizontal, que va de 0° a 360° , en el sentido de las manecillas del reloj. La determinación de I y D describen completamente la dirección del campo geomagnético. Si se conocen las componentes, la intensidad total del campo está dada por

$$H = \sqrt{H_N^2 + H_E^2 + H_V^2} \quad (1.10)$$

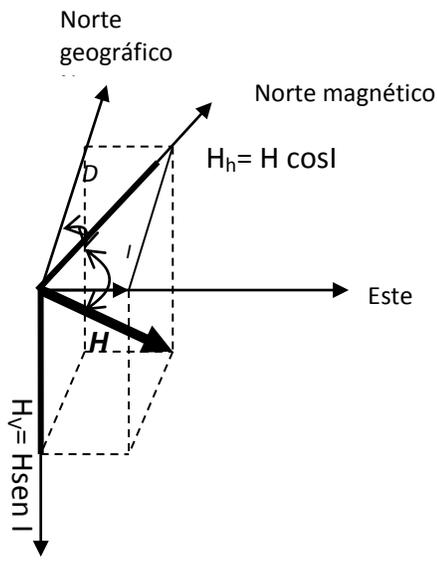


Figura 2.2 Descripción de la dirección del campo magnético. El vector total del campo magnético H se puede descomponer en (una componente vertical, $H_v = H \sin I$ y (2) una componente horizontal $H_h = H \cos I$; I , inclinación, es el ángulo vertical entre la horizontal y H ; la declinación, D , es el ángulo acimutal entre la componente horizontal de $H(=H_h)$ y el Norte geográfico; la componente del campo magnético en la dirección geográfica Norte es $H \cos I \cos D$; la componente este es $H \cos I \sin D$ (Tomado de Butler, 2004).

2.3 Variación Secular del Campo Magnético Terrestre

La dirección y la magnitud del campo geomagnético superficial cambian con el tiempo. Los cambios en periodos dominantes de tiempo entre 1 y 10 mil años constituyen la *variación secular del campo magnético terrestre*. Aún en el periodo de los registros históricos del campo geomagnético, los cambios en la dirección son sustanciales. La Figura 1.3 muestra los registros históricos de la dirección del campo geomagnético en Londres desde que se iniciaron los primeros registros confiables a partir del año 1600 d.C. El rango de inclinación es de 66° a 75° , y el rango de declinación es de -25° a $+10^\circ$, lo que hace más evidentes los cambios sustanciales en la dirección del campo geomagnético.

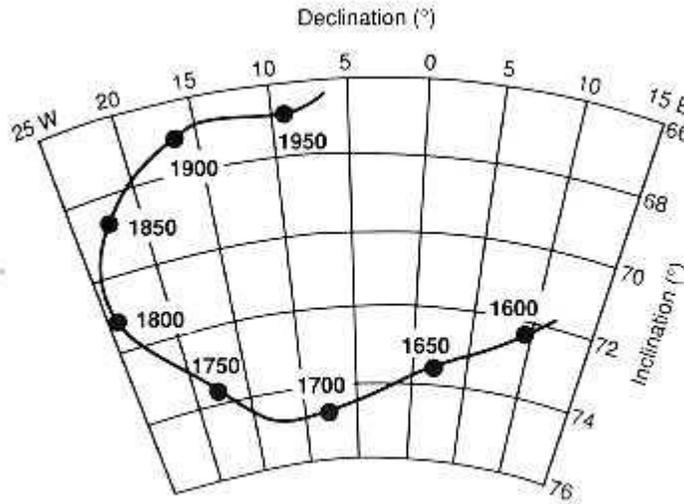


Figura 2.3 Registro histórico de la dirección del campo geomagnético en el observatorio de Greenwich, Inglaterra. Se muestran la declinación y la inclinación; los puntos están etiquetados en años a.D.; la proyección es acimutal y equidistante (Tomado de Butler, 2004).

Los patrones de la variación secular son similares en regiones subcontinentales. Por ejemplo, el patrón de la variación secular observada en París es similar a la observada en Londres. Sin embargo, de un continente a otro, los patrones de la variación secular son muy diferentes. Esta observación refleja probablemente la cantidad de fuentes no-dipolares del campo geomagnético en el núcleo terrestre.

El periodo dominante de la variación secular es mayor que el registro de Londres, y eso ocasiona muchas veces una impresión incorrecta acerca de que la variación secular es cíclica y predecible (Butler, 2004).

Uno de los principales objetivos de las investigaciones paleomagnéticas es obtener registros de la variación secular. Para reconstruir los estados del campo geomagnético en un tiempo anterior al de los registros históricos, es preciso recurrir a técnicas de estudio más complejas que aporten información de forma indirecta, tales como paleomagnetismo y arqueomagnetismo. Ambos métodos utilizan una técnica similar, sólo que los objetos de su estudio son materiales de diferente composición y edad: en el primer caso, rocas volcánicas y

sedimentos, y en el segundo, objetos fabricados por el hombre. En todos ellos se busca conocer la intensidad y dirección del campo geomagnético registradas en una magnetización remanente.

Tanto las rocas volcánicas como las piezas arqueológicas contienen, dispersos en una matriz de minerales diamagnéticos o paramagnéticos, una pequeña proporción de minerales ferrimagnéticos. Estos poseen la capacidad de orientar los espines de sus átomos en la misma dirección del campo geomagnético presente durante el enfriamiento, a partir de una temperatura mayor o igual a la de Curie. Al llegar a la temperatura ambiente, la roca habrá registrado una dirección paralela a la dirección local del campo geomagnético, y una intensidad que guarda una relación lineal con él. Habrá adquirido entonces una magnetización de tipo *termorremanente* (TRM, por sus siglas en inglés), y mientras no se llegue de nuevo a la temperatura de Curie, los cambios en el campo posteriores a ese momento no producirán ninguna variación en la magnetización de los granos (Thellier, 1938; Néel, 1955). Aunque los resultados que aportan estos materiales no son continuos sino espacial y temporalmente dispersos, su magnetización termorremanente tiene en muchas ocasiones una calidad y estabilidad térmica buenas.

En el registro histórico aparecen dos modos de variación secular. El primero es la deriva hacia el oeste del campo no-dipolar a una tasa de $0.2^\circ/\text{año}$. Esto puede verse en mapas del campo no-dipolar de diferentes épocas como los picos en la deriva del campo no-dipolar que deriva notablemente hacia el oeste con el tiempo. La dirección de la deriva puede inferirse a partir del registro de la variación secular de un solo sitio. Cuando se utilizan las gráficas inclinación vs. declinación para las direcciones, como se observa en la Figura 1.3 para Londres, este rizo en sentido de las manecillas del reloj generalmente indica una deriva hacia el oeste.

El otro patrón de variación secular predominante es el casi 8% de decremento lineal en el momento dipolar durante los últimos 150 años. Si observamos la tendencia en la intensidad del campo magnético en el tiempo podremos observar que es decreciente (Figura 1.4). También se sabe por estudios arqueomagnéticos en vasijas antiguas de arcilla que el campo magnético terrestre fue aproximadamente el doble de intenso en tiempos del esplendor del Imperio Romano que actualmente. Además, el eje dipolar también presenta una deriva hacia el oeste, y las características del campo no-dipolar han crecido y decaído con el tiempo. Los datos

arqueomagnéticos son críticos para determinar cómo estos patrones recientes o modos diferentes de la variación secular son evidentes en el tiempo prehistórico (Tauxe, 2009).

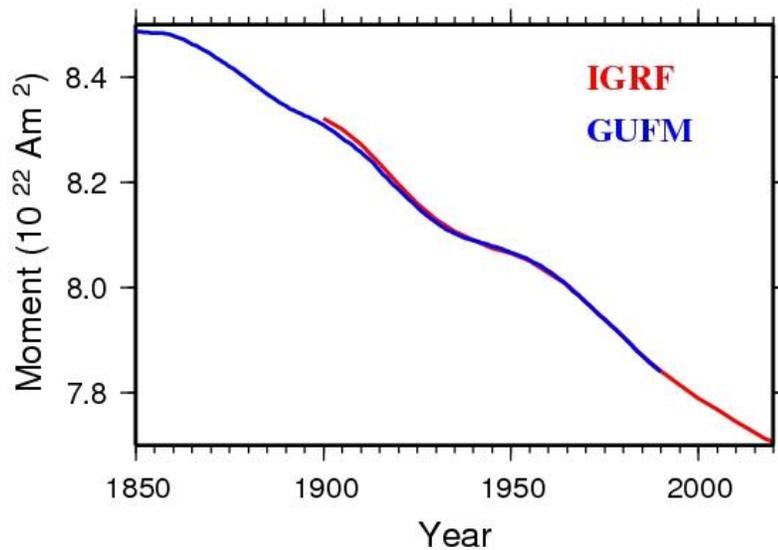


Figura 2.4. Tendencia de la intensidad del campo magnético terrestre (medida como el momento dipolar) en un periodo de 150 años según dos modelos matemáticos: IGRF (International Geomagnetic Reference Field) y GUFM (Jackson *et al*, 2000). De hecho se proyecta que en un periodo de 1500 a 1600 años el momento dipolar terrestre será de cero (Tomado de British Geological Survey: <http://geomag.bgs.ac.uk/education/reversals.html>).

3. Arqueomagnetismo

3.1 Introducción

Existen métodos científicos de datación bien establecidos como herramientas para la datación arqueológica y su aplicación se ha convertido en una rutina en las investigaciones arqueológicas. Hay varias técnicas disponibles a las que se recurre frecuentemente como la datación por radiocarbono y la dendrocronología. Sin embargo, ambas requieren la preservación de cantidades suficientes de materia orgánica y, cuando esta no está disponible, se requieren métodos de datación distintos. Una de ellas es la datación arqueomagnética cuyo principal atractivo es que utiliza la cerámica y piezas de arcilla cocida que frecuentemente se encuentran en los contextos arqueológicos. Además los periodos de datación arqueomagnética tienen la ventaja de ser más precisos que aquellos datados por radiocarbono, lo que la convierte en una técnica de datación invaluable para los arqueólogos.

El arqueomagnetismo es el estudio de la magnetización que ha quedado registrada en materiales de interés arqueológico, a partir del cual pueden determinarse las variaciones temporales en el campo magnético de la Tierra o para realizar dataciones. El desarrollo de esta disciplina ha permitido reconstruir los cambios en la dirección del Norte magnético para intervalos de tiempo de interés arqueológico, estudiando la magnetización de las estructuras de arcilla cocida (Eighmy et al, 1990. Wolfman, 1990).

El arqueomagnetismo es conocido principalmente por los arqueólogos como un método de datación. El arqueomagnetismo de arcillas cocidas fue desarrollado en Francia en la década de los cincuenta del siglo XX por Emile Thellier y su esposa Odile Thellier. Treinta años después se convirtió en un método confiable y preciso de datación de piezas horneadas, particularmente por M.J. Aitken en el Reino Unido. Este método de datación es interdisciplinario, requiere de la experiencia de especialistas en distintas áreas y particularmente una colaboración cercana entre arqueólogos y geofísicos, ya que es el arqueólogo quien suministra el material y la información necesarios para desarrollar, probar y, en su caso, mejorar el método de datación. Por otro lado, únicamente el arqueólogo es capaz de determinar el significado contextual de la datación arqueomagnética determinada en el laboratorio.

El arqueomagnetismo está basado en dos hipótesis físicas:

1. La Tierra genera espontáneamente un campo magnético que cambia tanto en intensidad como en dirección con el tiempo (variación secular).
2. Eventos específicos pueden provocar que los minerales magnéticos se magnetizen de manera permanente, registrando el campo magnético existente en el momento del evento.

Tanto la intensidad (**F**) como la dirección (inclinación, **I**, declinación, **D**) del campo geomagnético varían en el espacio y en el tiempo, y para cualquier región particular se pueden construir curvas de variación secular (SV). Si estas curvas están suficientemente bien definidas pueden usarse como herramientas para la datación relativa de piezas arqueológicas de la misma región. Para comparar la magnetización remanente de una pieza arqueológica con una curva SV, se tiene que determinar la edad de la magnetización. Si la magnetización está relacionada con un evento arqueológico conocido, entonces se puede dar una edad al evento. Esta condición puede encontrarse en material calentado, como pueden ser: cerámicas, ladrillos, vasijas, estructuras de combustión, horizontes quemados, superficies pintadas y cementadas, rocas volcánicas, sedimentos y escorias de fundición (Chiari and Lanza, 1997; 1999. Gram-Jensen et al. 2000. Zanella et al. 2000. Evans and Heller, 2003. Goguitchaichvili et al., 2004. Ben-Yosef et al., 2008a,b. Carrancho et al., 2009. Shaar et al. 2010, Carrancho and Villalaín, 2011. Carrancho et al., 2014. Kapper, L., 2014 a,b).

La datación arqueomagnética puede contener escalas de tiempo cortas (miles de años) y largas (millones de años) (Aitken et al. 1988). La última es una aplicación de la escala de tiempo de la polaridad geomagnética, y ha sido usada para datar eventos arqueológicos con una antigüedad mayor a 0.78 millones de años (la edad de la última inversión de la polaridad geomagnética)- usualmente aplicada a sitios con restos de homínidos (Partridge *et al*, 1999; McIntosh y Catanzariti, 2006).

El campo magnético de la Tierra varía en dirección e intensidad en escalas de tiempo que van desde milésimas de segundo a millones de años (Courtillet y Le Mouël, 1988; Merrill *et al*, 1996). Las variaciones que van de decenas de años a unos pocos milenios, que se piensa son generados por los componentes no-dipolares del campo actuando sobre el geodinamo, se conocen como la variación secular geomagnética (SV). El rango de tiempo necesario para producir un

modelo efectivo de la variación secular es mayor al proporcionado solamente por el registro histórico, el cual describe de la mejor manera las variaciones de la dirección del campo magnético en los últimos cuatro siglos (Alexandrescu *et al*, 1994; Jackson *et al*, 2000). Por otro lado, el rango de tiempo cubierto por los registros paleomagnéticos es mucho mayor (más antiguo a varias decenas de miles de años), sin embargo, la fidelidad del registro obtenido por métodos paleomagnéticos es bastante limitada tanto en lapsos extensos de tiempo así como en dataciones.

3.2 Magnetización remanente

De manera natural algunos minerales son capaces de retener una magnetización remanente o permanente. Por mucho el más prevalente de estos son los óxidos de fierro –magnetita, magemita y hematita- los cuales están presentes en la mayoría de los suelos, arcillas y como compuestos traza en muchos tipos de rocas (Thompson y Oldfield, 1986). Los cristales de estos minerales, las interacciones mecánico-cuánticas entre átomos vecinos forzando a todos los electrones no-pareados a alinear sus momentos magnéticos (Néel, 1955; Tauxe, 2002). Esta alineación ocurre en una región del cristal conocida como dominio magnético y la forma y tamaño de estos dominios dependerán de la estructura y tamaño del cristal así como las impurezas que contenga. Cada uno puede corresponder a un sólo grano del cristal (dominio simple), o un solo grano puede dividirse en varios dominios magnéticos con la energía más baja del sistema (multidominios). Cada dominio magnético tendrá una o más direcciones preferentes de magnetización, o “ejes fáciles”, determinados por su forma y por la estructura del cristal. La energía magneto-cristalina es mínima cuando la magnetización en los dominios cae en una de las dos direcciones paralelas al eje fácil. De esta manera el dominio tenderá siempre a magnetizarse en una de estas direcciones favorables.

Como cada dominio típicamente se magnetizará en una dirección diferente, orientada azarosamente, una muestra macroscópica del mineral puede contener un gran número de dominios los cuales exhibirán una magnetización neta despreciable. Sin embargo, si el mineral es calentado, la agitación térmica de la estructura del cristal provoca una disminución de la magnetización espontánea en cada dominio hasta que, a cierta temperatura crítica, conocida como **temperatura de bloqueo**, esta desaparece por completo (Figura 3.1).

En el enfriamiento, cada dominio se re magnetiza en la dirección del eje fácil más cercano paralelo a cualquier dirección del campo magnético ambiental. Aunque la mayoría de los dominios individuales no se alineen exactamente con la dirección del campo ambiental, en promedio tenderán a favorecerla. De esta manera, después del calentamiento, el mineral exhibirá una **magnetización termorremanente** (TRM) neta en la dirección del campo magnético que prevalezca al momento del enfriamiento.

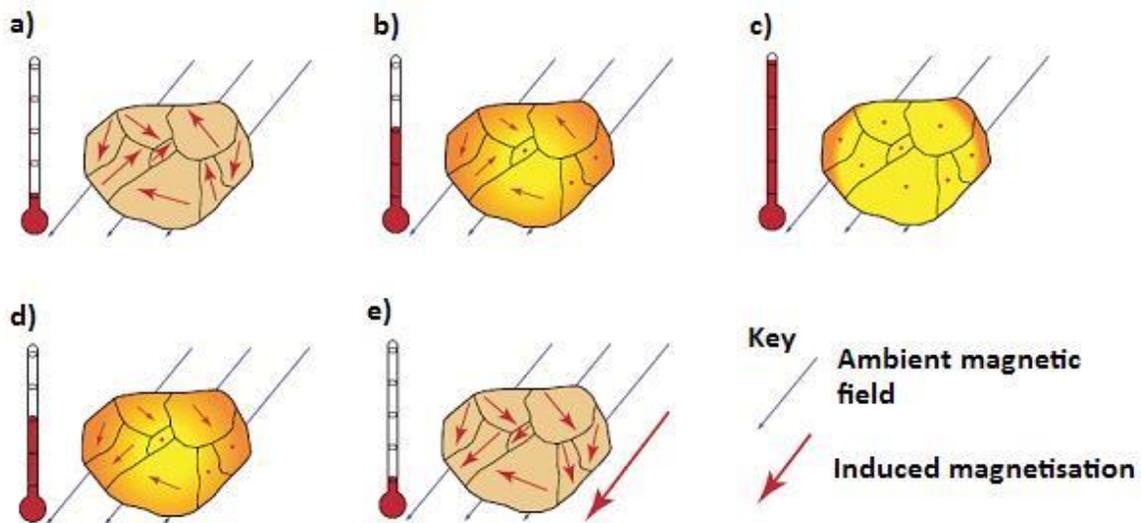


Figura 3.1 Magnetización termorremanente. Inicialmente los dominios magnéticos en una muestra se magnetizan en varias direcciones que se cancelan (a). Mientras se calienta la muestra los dominios se desmagnetizan mientras la temperatura excede su temperatura de bloqueo (b y c). En el enfriamiento, los dominios se re magnetizan en una dirección cercana al campo magnético que prevalece en el ambiente, resultando en una magnetización neta de la muestra (d y e) (Tomado de Linford, 2006).

Las temperaturas de bloqueo de los diferentes dominios magnéticos varían. La temperatura de bloqueo máxima está limitada por la temperatura de Curie del mineral particular involucrado (585°C para la magnetita y 675°C para la hematita) pero el tamaño de grano, la estructura del cristal y su pureza pueden reducir este límite. De hecho, aún sin calentamiento y en ausencia de un campo magnético externo, algunos dominios pueden perder espontáneamente sus direcciones con el tiempo. Generalmente, la probabilidad de que un cambio de este tipo ocurra durante un periodo de tiempo depende de la temperatura de bloqueo del dominio (mientras más baja sea, más probabilidad tiene de ocurrir). De forma natural las muestras de roca y de arcilla usualmente contienen una composición mineralógica y un tamaño de dominio heterogéneos y esto se exhibe en el espectro de temperaturas de bloqueo. Para ser capaz de retener una TRM estable, la muestra deberá contener una alta proporción de dominios magnéticos con temperaturas de bloqueo debajo de los 200°C. Es más probable que los dominios cuyas temperaturas de bloqueo están por debajo de los 200°C se re-alineen en escalas de tiempo arqueológico aún si no se calientan y se pueden seguir los cambios en las direcciones del campo magnético de la Tierra. Este fenómeno, llamado magnetización remanente viscosa (**VRM**), puede dejar una sobreimpresión parcial de la TRM adquirida cuando la muestra se calentó originalmente. Cuando se estén midiendo muestras arqueomagnéticas se debe tener cuidado en identificar y remover los efectos de dichas remanencias viscosas (Linford, 2006).

Así como la TRM, existe un segundo mecanismo llamado magnetización remanente deposicional (**DRM**) en los contextos arqueológicos. Esta magnetización involucra partículas de sedimento quemados y agua que poseen una magnetización total débil, debido a que están compuestas por minerales magnetizados termorremanentemente (aunque efectos químicos durante el crecimiento del cristal podrían resultar en magnetización remanente). Si están suspendidas en agua tranquila, tienden a rotar así que sus direcciones de magnetización se alinean con el campo magnético prevalente (Figura 3.2). Las fuerzas gravitacionales tenderán a empujar las partículas al fondo del cuerpo de agua donde se encuentran flotando y formarán una capa magnetizada en la dirección del campo magnético ambiental. Mientras más sedimento se acumule sobre esta capa, las fuerzas de fricción causadas por su peso eventualmente asegurarán las partículas magnetizadas en un solo lugar y ya no podrán rotar ni alinearse libremente. La

posterior acumulación de sedimento resultará en una secuencia estratigráfica de capas magnéticas, la cual será el registro de los cambios en el campo magnético terrestre durante el proceso de deposición. En ciertos casos las partículas de sedimento podrían no asegurarse en una posición hasta mucho después de haberse depositado y también es posible que los efectos químicos o de otro tipo puedan modificar la magnetización deposicional inicial. En estos casos la magnetización resultante se conoce como magnetización remanente post-deposicional (**pDRM**). Estos sedimentos magnetizados pueden encontrarse en fondos lacustres, paleocanales y en secciones de acequias arqueológicas donde la tasa del flujo fue relativamente baja.

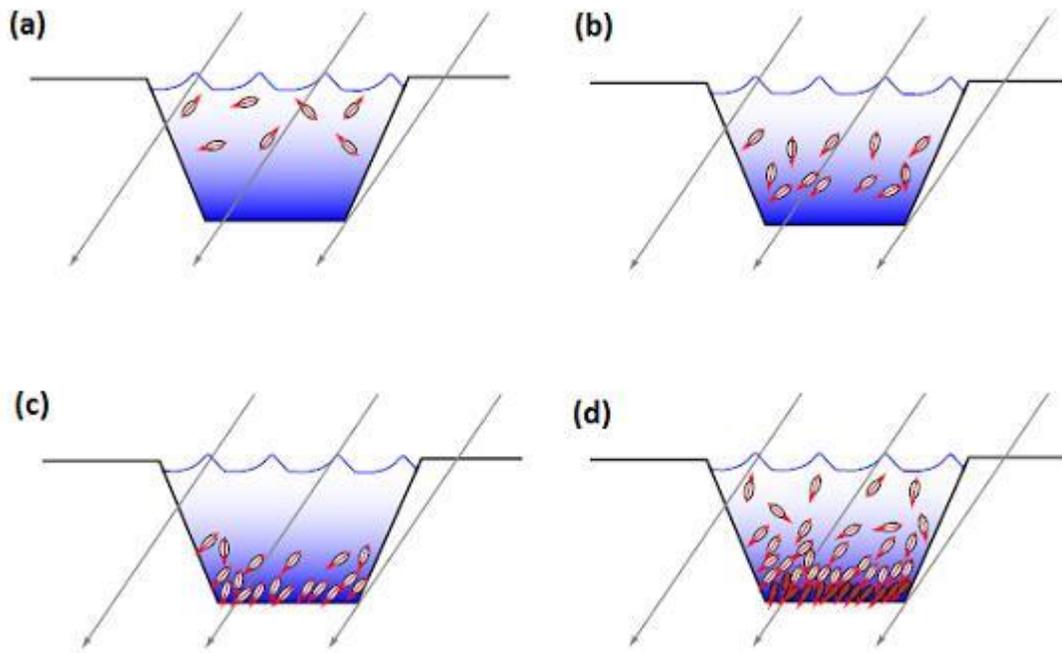


Figura 3.2 Magnetización deposicional remanente. Partículas de sedimento, cada una con una magnetización débil, están suspendidas en un cuerpo de agua tranquilo. Mientras van cayendo al fondo de la columna de agua las partículas rotan y alinean sus direcciones magnéticas internas con el campo magnético de la Tierra (a, b y c). Una vez depositadas en el fondo del cuerpo de agua, el peso del sedimento acumulado inmoviliza las partículas de la parte inferior, formando una capa de sedimento con partículas magnetizadas cuya dirección es igual a la del campo magnético terrestre (d) (Tomado de Linford, 2006).

3.3 Técnicas de datación arqueomagnética

Si se conoce la historia de los cambios en el campo magnético de la Tierra, entonces existen dos formas principales para datar una pieza arqueológica, estructura o depósito que haya adquirido magnetización remanente en algún momento del pasado.

El primer método es aprovechar el hecho de que la dirección del campo magnético terrestre ha cambiado en el tiempo. Cuando el campo geomagnético es registrado por un material magnético como se describió en la sección previa, generalmente es más fácil deducir la dirección del campo magnético de las medidas realizadas en el material que inferir la intensidad del mismo.

La técnica para conocer las arqueo direcciones supone establecer la posición aparente del polo Norte magnético indicado por la declinación e inclinación del campo registradas en el material y determinar en qué momento en el pasado el Norte magnético local estuvo en esa posición. Claramente, la pieza debe haber permanecido exactamente en la misma posición en la que estaba cuando adquirió la magnetización, lo cual limita el tipo de objeto que puede ser datado a estructuras no-portátiles. De esta manera, el análisis de datos de sedimentos lacustres (remanencia deposicional), un gran número de estructuras arqueológicas bien datadas (termorremanencia), así como mediciones directas con brújula de los últimos cientos de años, permiten construir una curva de calibración arqueomagnética.

Basada en todos esos datos, la Figura 3.3 muestra la variación de la posición aparente del polo Norte magnético como se vería desde el Reino Unido en los últimos 3000 años. En principio, la fecha en la cual un objeto arqueológico no portátil adquiere su magnetización remanente puede ser inferida midiendo la declinación y la inclinación de su magnetización, determinando la posición correspondiente del polo magnético y comparándola con la línea de tiempo datada.

El principal problema con la técnica para calcular arqueo direcciones es que si el objeto magnetizado fue movido, entonces la dirección del campo magnético registrada pierde valor. Por lo que fue desarrollado un segundo método de datación arqueomagnética el cual infiere la intensidad del campo magnético terrestre al momento en que la pieza adquirió su magnetización remanente a partir de la potencia de la magnetización en la pieza. Como en esta técnica no está involucrada la dirección del campo magnético, esta técnica tiene la ventaja de que cualquier objeto arqueológico portátil como los fragmentos de cerámica pueden ser datados. La potencia de magnetización adquirida en una muestra quemada depende de la intensidad del campo magnético terrestre al momento de la quema pero puede estar influido por muchos otros factores como la composición mineralógica y la temperatura del fuego.

Existe una técnica para corregir todos estos factores y para estimar la intensidad del campo ambiental al momento de la quema de la pieza. Este método fue desarrollado por E Thellier (1938) y ha tenido subsecuentes modificaciones. Dicho método implica calentar repetidas veces la muestra en un campo magnético controlado (o cero) en una serie de etapas

donde se va incrementando la temperatura y se mide la intensidad de la magnetización remanente después de cada etapa. Una vez que se ha removido toda la magnetización, nuevamente se repite todo el proceso pero con la muestra expuesta a un campo magnético de referencia durante cada calentamiento. Después de comparar los resultados es posible inferir la intensidad del campo magnético terrestre al momento de que la muestra fue originalmente quemada. Sin embargo, en esta técnica se requiere hacer muchas mediciones, en comparación con la datación direccional, y esto implica más errores. Estos errores pueden surgir de la heterogeneidad de la muestra, la anisotropía de la muestra, las diferencias entre la atmósfera original y la del laboratorio así como las diferencias en las tasas de enfriamiento en el calentamiento original y el del laboratorio (Tarling, 1983).

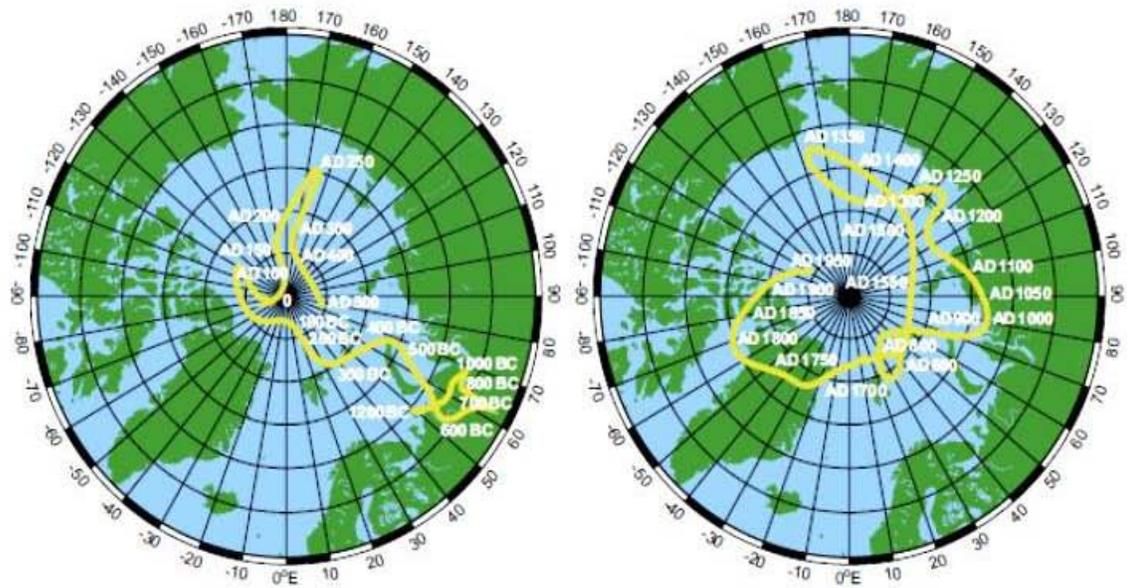


Figura 3.3 Movimiento de la posición aparente del polo norte magnético de la Tierra en el tiempo, basado en medidas arqueomagnéticas hechas en el Reino Unido. El diagrama de la izquierda muestra el movimiento desde la Edad de Bronce hasta el año 500 d.C. El diagrama de la derecha muestra el movimiento de esa fecha hasta el presente. (Modificado de Linford, 2006)

3.4 Estudios arqueomagnéticos en Europa

En Europa las investigaciones en la determinación de paleointensidades son más abundantes que en el resto del mundo, prueba de ello son las curvas de variación secular del campo magnético terrestre con las que ya se cuenta, las cuales cubren prácticamente todo el territorio europeo. Para construir una curva de variación secular es necesario contar con suficientes datos magnéticos que además tengan contraparte con algún otro tipo de datación, esto

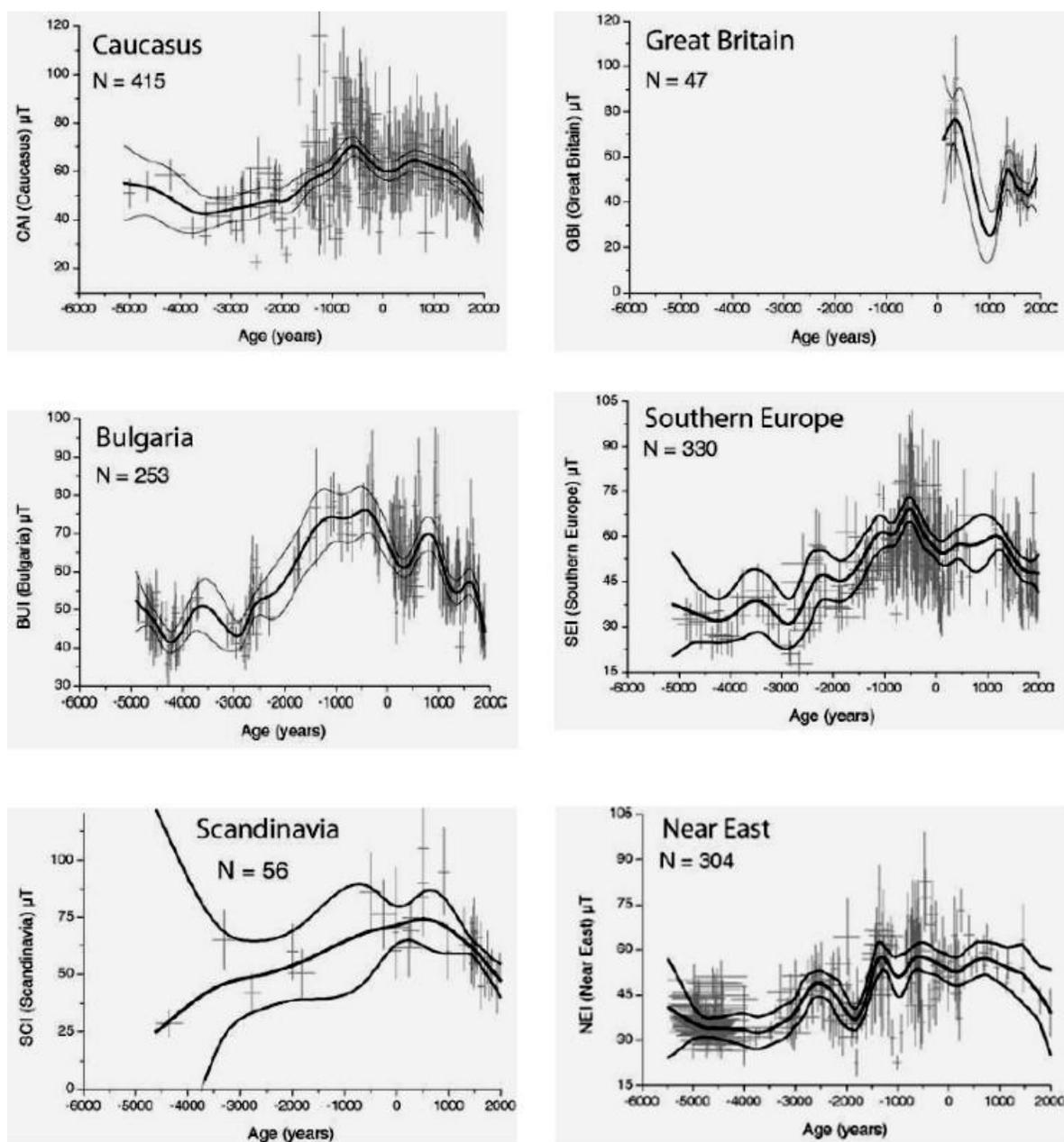
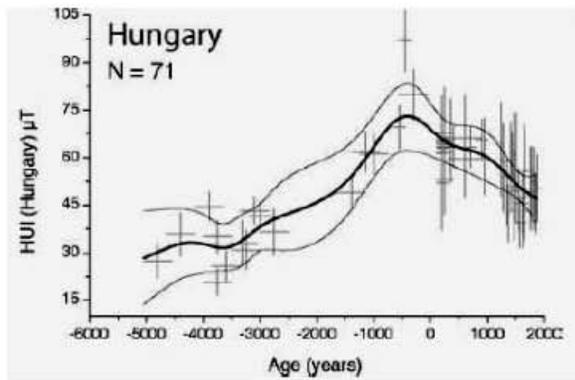
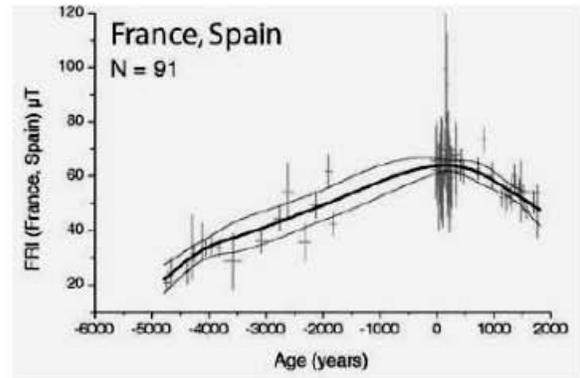
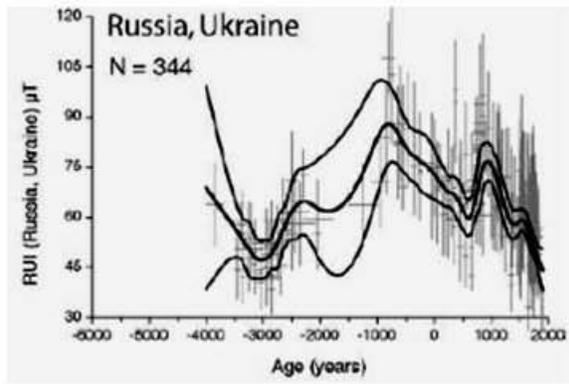


Figura 3.4 Ejemplos de curvas maestras o de referencia (Modificadas de Korte *et al.* 2005)

valida el dato que se pretende usar como integrante de la curva de variación secular del campo magnético terrestre, ejemplos de estas curvas se muestran en la Figura 3.4



Sigue Figura 3.4 Ejemplos de curvas maestras o de referencia (Modificadas de Korte *et al.* 2005)

3.5 Estudios arqueomagnéticos en América y Mesoamérica

México, y toda Mesoamérica, aun son considerados como *terra incógnita* desde el punto de vista arqueomagnético. Con excepción de los estudios de volcanes recientes (Nagata *et al*, 1965; Bucha *et al*, 1970; Lee, 1975; Aitken *et al* 1981; González *et al*, 1997; Böhnel *et al*, 1997; Morales *et al*, 2006, 2009, 2011, 2013, 2015; Böhnel *et al*, 2002;) se han realizado pocos esfuerzos en comparación con los realizados en Europa y Estados Unidos, para estudiar la impresionante herencia cultural de la región.

Las mediciones sistemáticas del campo magnético terrestre en México comenzaron a finales del siglo XVII en el observatorio geomagnético de Teoloyucan. La evolución del campo geomagnético anterior a la medición directa con instrumentos se estudia por medio del análisis de la magnetización remanente del material arqueológico, flujos de lava y sedimentos lacustres.

En Mesoamérica sobresalen los trabajos de Bucha *et al* (1970), Lee (1975), Aitken *et al* (1981), Urrutia-Fucugauchi (1994), Böhnel *et al* (2003), López-Téllez *et al* (2008), Morales *et al* (2009), Rodríguez-Ceja *et al* (2009) y Alva-Valdivia *et al* (2010), por mencionar algunos.

En Centroamérica está el estudio de Brandt y Costanzo - Álvarez (1999); en Venezuela: Costanzo-Álvarez *et al* (2006) y Rada *et al* (2008); en Perú: Kono *et al* (1986), y Shaw *et al* (1996); en Ecuador: Bowles *et al* (2002); en Brasil: Hartmann *et al* (2010); en Argentina: Goguitchaichvili *et al* (2011) [En Morales *et al* (2011)]. Todos estos estudios se han dedicado principalmente a recuperar la intensidad del campo antiguo así como a investigar las propiedades magnéticas de las cerámicas arqueológicas.

Luego de varias décadas de trabajo, es notable la gran cantidad de material que se ha recopilado y clasificado en estos sitios. Si bien es cierto que las muestras halladas *in situ* son escasas en toda el área, las piezas de cerámica de arcillas cocidas, por el contrario, son numerosas. A pesar de esto, el acervo arqueológico mesoamericano ha sido poco aprovechado para su uso en el campo del arqueomagnetismo (Rodríguez, 2009)

En sitios del territorio mesoamericano, el primer trabajo de arqueodirecciones fue realizado por Daniel Wolfman en 1973 (Wolfman, 1990). Él estudió las direcciones arqueomagnéticas de algunos pisos quemados del centro de México, Oaxaca y Guatemala. La principal limitante de este trabajo pionero fueron las dataciones poco confiables que dificultan la construcción de una curva maestra, además de la escasez de material orientado.

4. Arqueointensidad

4.1 Introducción

Como ya se ha indicado con anterioridad, también la intensidad del campo magnético terrestre experimenta una variación ininterrumpida. El estudio de la intensidad absoluta del campo magnético de tiempos históricos y protohistóricos recibe el nombre de *arqueointensidad*.

A diferencia de lo que ocurre con los estudios direccionales, las muestras empleadas para este tipo de investigaciones no precisan de orientación, aunque siempre sea aconsejable tener un cierto control sobre su posición original. Sin embargo, por regla general la puesta en práctica de las determinaciones de arqueointensidad reviste una dificultad mucho mayor que la obtención de datos de dirección (Gogitchaichvili *et al.*, 2003 y 2004; Le Goff, 2004; Yu *et al.*, 2004; Coe *et al.*, 2004).

Mientras que la dirección del campo magnético terrestre se puede obtener directamente del vector de la magnetización, ya que ambos son, en la mayor parte de los casos, prácticamente paralelos, su magnitud es proporcional a la de la imantación, de forma que, con el fin de obtener el valor de la arqueointensidad, se hace necesaria la realización de experimentos de re imantación. Por este motivo, la determinación de la arqueointensidad es una tarea laboriosa, y los experimentos se caracterizan por su larga duración y complejidad.

Cuando se estudia en particular la variación de la intensidad de campo magnético en materiales arqueológicos que han sido expuestos a altas temperaturas, como es el caso de hornos, pisos quemados y cerámicas, se está hablando de un estudio de arqueointensidad. Este estudio se vale de mediciones que indirectamente darán información de la intensidad de campo existente al momento del último calentamiento del material en cuestión. Para tener una buena estimación de la arqueointensidad se requiere de una gran estabilidad en la magnetización termorremanente, se ha observado que las muestras arqueológicas de

cerámica que graban una magnetización termorremanente durante su proceso de fabricación proveen de resultados satisfactorios.

4.2 Técnicas para determinar la dirección del Campo Magnético Terrestre

Actualmente, existen protocolos bien establecidos que garantizan la determinación experimental precisa de la dirección del campo geomagnético antiguo. Dichos protocolos implican principalmente procedimientos de desmagnetización a intervalos o por pasos, como la desmagnetización térmica progresiva (TH) y la de campos alternos (AF). El objetivo principal de estas técnicas de laboratorio es borrar cualquier registro secundario y definir la Magnetización Remanente Característica (ChRM, por sus siglas en inglés) adquirida durante el último calentamiento/enfriamiento de la pieza arqueológica.

Zijderveld (1967) propuso una representación gráfica de los resultados de la desmagnetización usando proyecciones ortogonales de dos dimensiones que hacen posible la representación e interpretación del vector del campo geomagnético en cada paso de desmagnetización. Kirschvink (1980) usó mínimos cuadrados de los datos de desmagnetización para calcular la ChRM. Se han propuesto un sinnúmero de interpretaciones estadísticas de datos de dirección con el fin de calcular la dirección promedio para una estructura dada, tomando en consideración los registros obtenidos a partir de diferentes muestras colectadas y para estimar la confiabilidad y precisión del valor medio obtenido. Tradicionalmente y hasta nuestros días, la dirección promedio para una estructura dada se calcula usando la estadística de Fisher (Fischer, 1953). Más recientemente Lanos *et al* (2005) introdujeron la importancia de usar la aproximación jerárquica durante el muestreo, así como durante la interpretación de los datos y el cálculo de la dirección promedio final. Esta aproximación elimina errores casuales y sistemáticos posiblemente causados por la heterogeneidad de la magnetización en diferentes partes de la estructura estudiada, la orientación *in situ* de las muestras y las mediciones en el laboratorio.

Durante los últimos años se han desarrollado muchos paquetes de software que hacen posible una interpretación más fácil y rápida de los resultados direccionales; por ejemplo: PaleoMac (Cogné, 2003), Remasoft (Chadima y Hroudá, 2006) o PmagPy.

Gracias a los importantes avances en la medición e interpretación de los datos de dirección e intensidad del campo geomagnético fue posible investigar posteriormente y entender mejor los posibles factores que podrían causar una diferencia en la dirección magnética registrada en el material arqueológico del verdadero campo magnético terrestre. Se ha observado que los procesos de fabricación de materiales cerámicos como baldosas y tabiques a veces provocan el alineamiento preferencial de los granos magnéticos, lo que causa la desviación de la dirección remanente con respecto a un campo externo (Aitken *et al*, 1981; Veitch *et al*, 1984; Lanos, 1987).

Más recientemente la investigación arqueomagnética ha estado enfocada en el efecto de la anisotropía magnética sobre la dirección arqueomagnética. Hus *et al* (2002, 2003) investigaron el origen de la fábrica magnética en tabiques y su implicación en arqueomagnetismo. Tema (2009) investigó de manera sistemática la anisotropía magnética de tabiques provenientes de hornos arqueológicos de Italia. Las mediciones de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS), la magnetización remanente isotérmica (AIRM) y la magnetización remanente anhisterética (AARM) mostraron por un lado que la fábrica magnética plana bien desarrollada era similar a la forma aplanada de los tabiques y que si los tabiques estaban acomodados de manera horizontal en el horno, esta fábrica plana, provocaba una ligera inclinación de la dirección arqueomagnética con respecto a aquella del campo magnético terrestre en el momento de su último enfriamiento. Todos estos estudios muestran que el estudio de la anisotropía magnética de las piezas arqueológicas tales como ladrillos y baldosas puede ser importante y podría tomarse en consideración en los estudios de dirección, mientras que en el caso de cerámica horneada y en quemas en hornos abiertos, la anisotropía parece ser menos importante o incluso despreciable (Kovacheva *et al*, 2009).

4.3 Técnicas para determinar la intensidad del Campo Magnético Terrestre

Mientras que los procedimientos para determinar la dirección del campo geomagnético se encuentran más o menos estandarizados, aún existen diferencias significativas entre laboratorios sobre la mejor manera de obtener estimaciones fiables de paleo y arqueointensidades.

Los métodos de determinación de estas magnitudes que cuentan con un fundamento físico más riguroso y proporcionan los resultados más fiables (Prévot y Perrin, 1992) son los basados en el método original de Thellier (Thellier, 1937; Thellier y Thellier, 1959; Coe, 1967), en los cuales la intensidad del campo magnético imantador original B_a se obtiene en el laboratorio a partir de experimentos de reimpantación térmica en un campo aplicado B_{lab} , siendo $B_a = B_{lab} (TRM_a/TRM_{lab})$. TRM_a y TRM_{lab} son las imantaciones remanentes, original y adquirida en el laboratorio, respectivamente.

El principio que se utiliza para hallar la arqueointensidad se basa en la relación aproximadamente lineal que hay entre la magnetización termorremanente adquirida TRM_{paleo} , y el campo geomagnético presente durante la adquisición de la magnetización, H_{paleo} . De donde tenemos: $TRM_{paleo} = AH_{paleo}$, donde A es una constante de proporcionalidad, y en ella se agrupan los términos referentes a tamaño de grano, forma, temperatura de bloqueo y propiedades magnéticas. Si la muestra adquiere una nueva magnetización en laboratorio TRM_{lab} , en presencia de un campo conocido H_{lab} con la misma constante de proporcionalidad A, entonces, $TRM_{lab} = AH_{lab}$, podemos obtener, $H_{paleo} = \left(\frac{TRM_{paleo}}{TRM_{lab}} \right) H_{lab}$, todos parámetros conocidos. La ecuación anterior es válida si y solo si, la constante A es la misma en los dos casos. Pero si el material sufrió un proceso difícil de reproducir en laboratorio esta constante A no será necesariamente igual en los dos casos.

Para determinar la paleointensidad absoluta en objetos cuya remanencia es térmica, debe verificarse, además de que A sea igual, que la relación entre la magnetización y el campo presente durante su adquisición sea lineal.

Continuamente se proponen métodos mejorados con el fin de incrementar el porcentaje de éxito y la alta calidad de los datos de arqueointensidad. Thellier y Thellier (1959) establecieron su método fundamental Thellier-Thellier, en el cual las muestras se calientan y se enfrían dos veces en cada paso de temperatura. Ambos pasos de calentamiento/enfriamiento a cierta temperatura se llevan a cabo en presencia del campo magnético ambiental, pero la orientación de la muestra cambia 180° (Dunlop, 2007).

La NRM disminuye un poco para cada etapa de temperatura, mientras se va adquiriendo una nueva magnetización ante un campo aplicado en el laboratorio H_{lab} . La dirección del campo aplicado en laboratorio durante el segundo calentamiento es opuesta a la del primero, y esto puede lograrse colocando las muestras anti paralelas o cambiando el campo directamente, se verifica si la muestra conserva su capacidad de adquirir TRM en pasos alternados, detectando y eliminando las alteraciones físicas y/o químicas producidas por los calentamientos en el laboratorio, en este método se presume la independencia de la PTRM adquirida por enfriamiento entre dos etapas de temperatura de aquella adquirida entre cualesquiera otras dos etapas. Además que una magnetización generada por enfriamiento desde una cierta temperatura podrá removerse completamente por calentamiento a la misma temperatura. En suma las temperaturas de bloqueo y desbloqueo, son iguales. Los pasos necesarios para calcular la paleointensidad según el método de Thellier y Thellier son los siguientes:

1. Calentar la muestra hasta la temperatura T_1 ; con esto se habrá perdido la parte de NRM correspondiente a las temperaturas de bloqueo tales que $T_c > T_B > T_1$, quedando una magnetización menor M_{NRM} . Al dejar enfriar en un campo artificial H_{lab} , la muestra adquirirá una PTRM. Midiendo la remanencia combinada se obtendrá el vector de magnetización: $M_1 = M_{NRM} + PTRM$

2. Calentar la muestra hasta T_1 y enfriar en presencia de un campo anti paralelo al anterior, es decir, $-H_{lab}$. El segundo vector de magnetización generado será: $M_2 = M_{NRM} - PTRM$

A partir de la suma o resta de las dos ecuaciones anteriores es posible conocer la M_{NRM} que permanece de la NRM original, así como la PTRM ganada en la primera etapa de calentamientos – enfriamientos a T_1 . Los pasos 1 y 2 se repiten a temperaturas que se incrementan progresivamente.

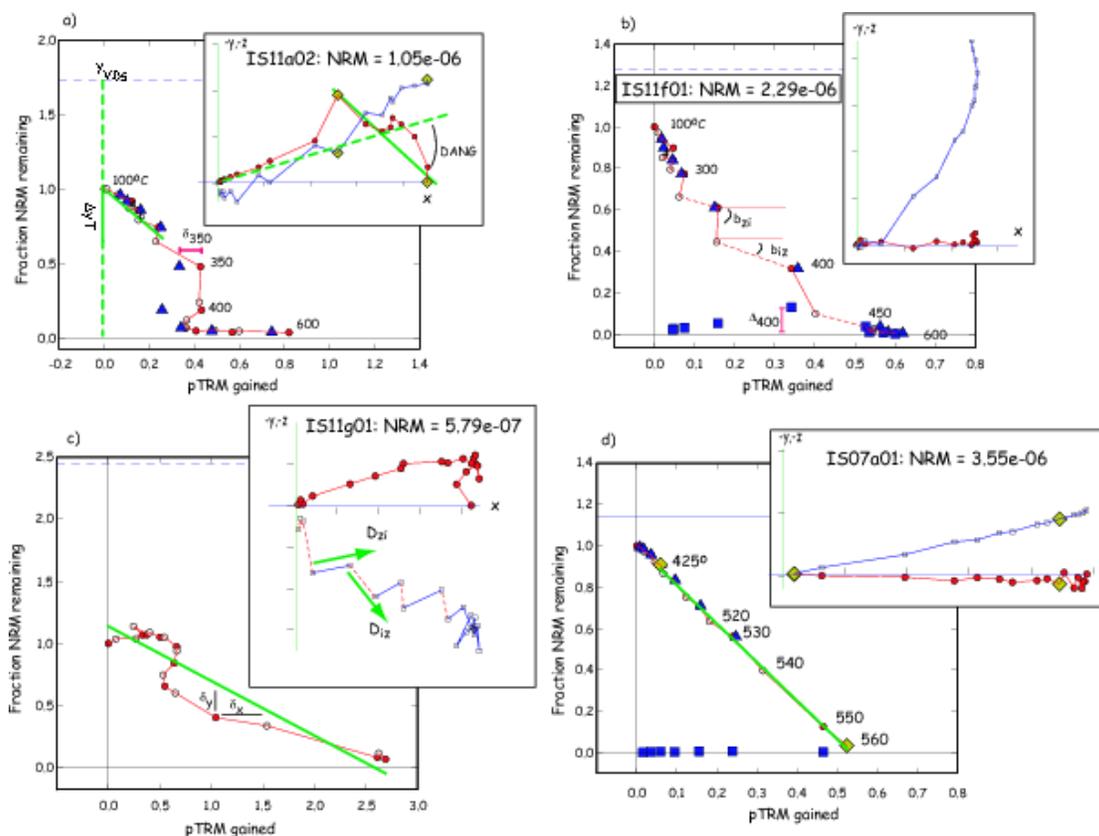


Figura 4.1 Parámetros de la calidad de la arqueointensidad en diagramas Arai y diagramas vectoriales (en recuadros). Los símbolos cerrados representan los resultados con el método ZI mientras que los símbolos abiertos representan los resultados con el método IZ. Los triángulos son revisiones pTRM y los cuadrados son revisiones de las terminaciones pTRM. Las líneas horizontales punteadas son la suma de las diferencias vectoriales de los pasos de la NRM. El campo de laboratorio se aplicó a lo largo de $-z$. (a) La diferencia entre pTRM y la medida original en cada paso es σT_1 . (b) Los datos exhiben un comportamiento de zig-zag por la diferencia significativa entre las temperaturas de bloqueo y desbloqueo. (c) El zig-zag es por las direcciones comparadas entre aquellas calculadas entre los pasos ZI e IZ con aquellas entre los pasos IZ y ZI. (Tomada de Ben Yosef *et al*, 2008)

Con la información que se obtiene de las etapas de calentamiento – enfriamiento, y se subsecuente incremento progresivo es posible generar un diagrama denominado de Arai en donde se grafica la ganancia paulatina de PTRM contra la porción de NRM (o M_{NRM}) que permanece después de cada doble calentamiento – enfriamiento a una misma temperatura (Figura 4.1). A temperaturas bajas, típicamente en el diagrama de Arai se obtiene una recta como relación entre la ganancia paulatina de PTRM contra la porción de NRM (o M_{NRM}) que permanece después de cada doble calentamiento – enfriamiento a una misma temperatura, entonces se puede obtener la pendiente de la recta y al multiplicar el valor de dicha pendiente por el campo aplicado en laboratorio se obtiene el valor de la intensidad del campo geomagnético antiguo de la muestra, a temperaturas altas suelen ocurrir cambios químicos que modifican la mineralogía de las muestras y por consecuencia alteran la capacidad de las mismas de adquirir PTRM. A partir de este punto no tiene ningún sentido seguir con el experimento.

La aplicación de este método permite detectar el momento en que se modifica la mineralogía de la muestra. El procedimiento consiste en que, una vez alcanzada cierta temperatura T_2 , se repite un calentamiento en presencia del campo en dirección H_{lab} a una temperatura $T_1 < T_2$ previamente alcanzada. Con ello se tendrán 2 registros de adquisición de PTRM para una misma temperatura T_1 . Comparando las dos relaciones $M_{NRM}/PTRM$ para T_1 , se podrá saber si la capacidad de adquirir PTRM ha cambiado o se conserva. Una diferencia no mayor a $\pm 15\%$ se considera aceptable y por consiguiente los datos se pueden aceptar en el cálculo de la paleo intensidad.

Existen varias propuestas para refinar del método Thellier-Thellier original como, por ejemplo, el método de Coe o método ZI, donde la muestra se calienta a cierta temperatura T_i y subsecuentemente se enfría en campo cero (para determinar la pérdida de NRM). Después se calienta nuevamente a T_i , pero se enfría en presencia de campo magnético (para determinar la pTRM ganada) (Coe, 1967a). La temperatura T_i se incrementa progresivamente hasta la temperatura máxima de desbloqueo de la muestra. En este proceso la NRM es reemplazada progresivamente por pTRM. Para evitar la desventaja del método de Coe, que es la no-detección de los componentes de la remagnetización que pudieran producirse durante subsecuentes calentamientos en presencia de campo y haberse

obtenido por granos con alta temperatura de bloqueo, conocido como “efecto de la memoria en campo cero”, Aitken (1988) propuso el método IZ el cual es una modificación del método ZI, en el cual primero se aplica la TRM antes de que la NRM sea desmagnetizada por calor en campo cero (Valet, 2003).

En las primeras etapas de desarrollo del arqueomagnetismo, los científicos reconocieron uno de los problemas más grandes durante los experimentos de arqueointensidad: la intensidad obtenida podría verse modificada por las alteraciones químicas debidas a las elevadas temperaturas y los continuos calentamientos a los que se sometía la muestra. Con el fin de reducir el número de calentamientos del espécimen, Kono y Ueno (1977) propusieron aplicar un campo perpendicular a la dirección de la NRM. Pero debido a que técnicamente es muy difícil posicionar la muestra en el horno, los errores experimentales son muy grandes (Valet, 2003).

Se ha mostrado (Yu *et al.* 2004) que los métodos IZ y ZI tienen una fuerte dependencia angular con la dirección del campo magnético, mientras que el método Thellier-Thellier es independiente de la dirección del campo, debido a la rotación de 180° de la muestra. En la versión más reciente del experimento propuesto por Tauxe y Staudigel (2004) y Yu *et al.* (2004), los métodos IZ y ZI se combinan en el método llamado IZZI, con el cual es posible detectar la dependencia angular (Yu y Tauxe, 2005).

Los experimentos tipo Thellier usan las temperaturas de bloqueo de los minerales magnéticos. Paralelamente a estos experimentos, se han propuesto otros, en los que se usan las propiedades del espectro de coercitividad del material para determinar arqueointensidades, sin embargo la ARM utilizada en estas modificaciones no es completamente equivalente a la TRM y debe ser aplicada con cuidado.

Un método más reciente, el método Pseudo-Thellier que ha sido aplicado numerosas veces en secuencias sedimentarias (p. ejem; Tauxe *et al.*; 1995) o en lavas (De Groot *et al.*; 2013), podría ser una técnica promisoría también para piezas arqueológicas. Este método fue exitoso donde aquellos métodos por calentamiento no lo fueron, debido a que las muestras no son alteradas térmicamente. La desmagnetización NRM se compara

con la ARM adquirida para tener un número mayor de valor de AF del campo. Para la calibración de los valores relativos se usaron los modelos del campo geomagnético.

Un método que parece implementar al máximo la no-modificación química de la muestra, es el uso de microondas como fuente de calor. Inicialmente, Walton (1991) sugirió un método para corregir la alteración química producida por el calentamiento que consistía en calentar y enfriar de forma rápida las muestras en presencia de campo. En este método se asume que la desmagnetización por microondas es idéntica a la desmagnetización por calentamiento convencional. Los granos magnéticos se calientan rápidamente, mientras que la matriz lo hace lentamente. Esto favorece el enfriamiento rápido de las partículas magnéticas, las cuales se equilibran con la matriz.

En un estudio reciente de Poletti *et al.* (2013) se investigó la tendencia de valores altos de arqueointensidades cuando se comparaban con resultados obtenidos con métodos convencionales de doble calentamiento a los que se les había aplicado un factor de corrección de enfriamiento.

Hoffmann (1989) propuso uno de los primeros métodos multiespecimen, el cual trata de minimizar tanto el número de calentamientos como el pico de temperatura. En este método se calientan dos veces varios especímenes hermanos. En el primer enfriamiento se enfría en campo-cero, y en el segundo se enfría en presencia de un campo elegido en el laboratorio. Cada espécimen se calienta a diferente temperatura. En su método de multiespecimen la cantidad de calentamientos se reduce a dos y de esta forma también se reduce la fuente de errores durante el experimento.

Hoffman y Biggin (2005) mejoraron este método introduciendo un total de cinco pasos de calentamiento en lugar de dos, en el cual los primeros tres sirven como desmagnetización en campo cero, seguidos por un enfriamiento en presencia de campo y finalmente en un enfriamiento en campo cero. La secuencia de los primeros tres pasos asegura por un lado la remoción del componente viscoso y por el otro un comportamiento únicamente vectorial durante la desmagnetización térmica. Los pasos adicionales de calentamiento mejoran la calidad de la determinación de la arqueointensidad.

Dekkers y Böhnel (2006) introdujeron una variación al método multiespecimen, el método multiespecimen diferencial paralelo pTRM, haciendo uso de la linealidad de las pTRM con la inducción del campo magnético. En ese protocolo todos los especímenes adquieren pTRM de laboratorio a una misma temperatura y en un solo paso de calentamiento, pero a diferentes campos magnéticos elegidos en el laboratorio. La pTRM es adquirida de forma paralela a la TRM antigua, con el fin de evitar los extremos de altas temperaturas de pTRM de multidominios (MD). La ventaja de este protocolo es que puede elegirse una temperatura baja con el fin de evitar alteración química. Unos años más tarde Fabian y Leonhart (2010) encontraron que el protocolo propuesto por Dekkers y Böhnel (2006) es dependiente del estado del dominio., es decir, existe una fuerte tendencia en la determinación de la intensidad debida a grandes dominios pseudo-simples (PSD) y multidominios de tamaño de grano pequeño cuando se calientan en campo cero y complementaron el experimento original de Dekkers y Böhnel (2006) con tres pasos de medición adicionales. Uno se utiliza para aislar la NRM correcta, la que se utiliza para normalizar la pTRM ganada. El siguiente paso da una estimación para el estado del dominio, y un paso final en donde se repite la medición con el fin de detectar la alteración o estabilización del estado del dominio.

Le Goff y Gallet (2004) desarrollaron un magnetómetro de tres ejes con vibración de muestra (TRIAXE, por sus siglas en inglés) que permite mediciones continuas con magnetización de alta temperatura y adquisición de TRM. La ventajas de esta metodología son que una muestra toma sólo 2.5 horas, y se toman en cuenta tanto la dependencia de la tasa de enfriamiento como la anisotropía de TRM.

Con el objetivo de refinar las determinaciones de arqueointensidad y detectar comportamientos erróneos principalmente debidos a la alteración térmica durante el experimento o granos sin dominio, con el tiempo se fueron adicionando varias pruebas a los experimentos tipo Thellier. Thellier y Thellier (1959) y posteriormente Coe (1967) propusieron la prueba pTRM para saber la alteración magnética y mineralógica. La prueba pTRM sirve para saber la capacidad que tiene cada espécimen para adquirir una pTRM. Mucho después se introdujo la prueba de cola pTRM para verificar si la pTRM adquirida era removida completamente a cierta temperatura.

Krásá *et al* (2003) introdujo un procedimiento, llamado prueba aditiva para detectar granos multidominio, que puede producir interpretaciones ambiguas en los experimentos de arqueointensidad.

Sin embargo, como ya lo había sugerido Thellier y después lo enfatizó Dunlop (2011), el punto clave para una alta tasa de éxito es realizar una pre-selección de muestras para determinar arqueointensidad basada en sus propiedades magnéticas. Deben evitarse los especímenes térmicamente inestables o especímenes que contengan partículas con multidominio o con dominio simple. Otro factor que produce una determinación inexacta de la intensidad es la anisotropía de los granos magnéticos. Veitch *et al.* (1984) calcularon el factor de corrección para la anisotropía basado en el tensor de la TRM.

4.4 Estudios de arqueointensidad en América

Se han llevado a cabo pocos estudios de arqueointensidad de alta calidad en América principalmente en el suroeste de los Estados Unidos y el noroeste de Sudamérica (Kono *et al*, 1986; Sternberg, 1989; Bowles *et al*, 2002 en López-Téllez, 2007)

Hasta donde se sabe, son escasos los estudios detallados concernientes a la paleointensidad y los procesos de manufactura de las piezas arqueológicas. Es poco entendida la relación entre la determinación de arqueointensidades y su relación con varios parámetros como las propiedades magnéticas de los materiales originales usados para la elaboración de las piezas, temperaturas máximas alcanzadas y homogeneidad térmica en el interior de los hornos. Sin embargo, diferentes grupos han realizado algunos estudios experimentales para responder algunas de estas cuestiones (Morales *et al*, 2011).

A pesar de la rica herencia cultural y de los abundantes hallazgos arqueológicos encontrados en Mesoamérica, los datos de intensidad magnética absoluta son todavía escasos y de características disímiles (Pineda-Duran, 2011). El estudio pionero de arqueointensidad en la región de Mesoamérica presentado por Morales y colaboradores en 2009 forma parte del esfuerzo por establecer la curva de

variación de arqueointensidad para la región, como también el trabajo G. Fanjat, y colaboradores en 2013 que se encaminan a la construcción de una curva de variación secular del módulo campo magnético para Mesoamérica.

Ya que todavía la curva maestra de arqueointensidad para la región de Mesoamérica presenta limitaciones espacio-temporales, se utilizan curvas de datos globales reducidas a las áreas de estudio como alternativa de datación. Además se aplican en algunos estudios, como el realizado por López Téllez y colaboradores (2008) en cerámica precolombina de Veracruz, México, diversos experimentos magnéticos (susceptibilidad vs. curvas de temperatura, campos alternos y desmagnetización térmica, ciclos de histéresis, saturación magnética isotérmica y arqueointensidad) con el fin de caracterizar las propiedades magnéticas de los materiales contenidos en las cerámicas arqueológicas.

En 2002 Julie Bowles publicó una compilación de todos los datos de paleointensidad del continente disponibles hasta ese momento. En ellos las edades fueron determinadas por una variedad de métodos, y el promedio de sus incertidumbres es cercano a ± 140 años. Este alto valor provoca que las fluctuaciones de periodos cortos (< 200 años) en la intensidad del campo geomagnético, no puedan ser determinadas de forma confiable.

Los valores de arqueointensidad de todo el continente, publicados hasta ahora, son los resultados de algunos estudios hechos principalmente con arcillas cocidas y algunas muestras volcánicas. En América del Norte la mayor parte de la información proviene de Estados Unidos, de una región de aproximadamente 1000 Km de ancho, que comprende partes de los estados de Arizona, Nuevo México, Colorado y Utah (Bucha et al, 1970; Lee, 1975; Hsue, 1978 y Sternberg, 1989 en Bowles, 2002). Las edades no llegan a tener más antigüedad que unos 2000 años, pues ha sido difícil encontrar materiales de tiempos previos.

En la región de América del Sur por otro lado, la información se ha obtenido a partir de piezas arqueológicas de algunas zonas de Ecuador, Perú y Bolivia (Nagata et al., 1965; Kitazawa y Kobayashi, 1968; Gunn y Murray, 1980; Kono et al., 1986 y Yang et al. 1993 en Bowles, 2002). Las edades se concentran en los pasados 2000 años, aunque hay una cantidad significativa de datos que cubren el periodo de 2000 a 4000 AP.

El interés por determinar arqueointensidades del centro y Sur de México se ha incrementado en los últimos años aunado a que los estudios de la intensidad geomagnética (arqueointensidad) tienen la ventaja de no requerir material orientado. Los trabajos de López-Téllez et al (2008) en Veracruz (este de México), Morales et al (2009 a y b) en Chiapas y Durán et al (2010), en Michoacán (sureste y occidente de México, respectivamente, así como de Pineda-Durán (2011) en Colima reportan algunos datos de intensidad a partir de cerámicas cocidas precolombinas. Por otra parte Alva-Valdivia et al (2010) realizaron una investigación detallada de magnetismo de rocas y arqueointensidad en cerámicas de Guatemala. También se cuenta con estudios de lavas recientes del volcán Xitle (Morales et al., 2006) así como la determinación de arqueointensidades en tiestos del Valle de Oaxaca del periodo preclásico (1400-700 A.C) de Mesoamérica (Petronille et al, 2012).

Todos estos esfuerzos proveen evidencia significativa para determinar la evolución temporal de la intensidad del campo geomagnético para un área y un periodo que estaba poco estudiado. De esta manera se contribuye de manera importante al establecimiento de una curva maestra local para los últimos 3500 años. Cuando dicha curva se construya se volverá una herramienta fundamental para la datación, correlaciones de intensidad del campo con eventos climáticos y evolución de las civilizaciones en un área de gran importancia geológica y arqueológica.

4.4.1 Estudios de arqueointensidad en el Occidente de México

Los estudios de arqueointensidad en la región conocida como Occidente de Mesoamérica, son todavía escasos. En la tesis doctoral de Pineda-Duran (2011) se realizaron mediciones sistemáticas de arqueointensidad en piezas de cerámica de varios sitios ubicados en dicha región.

Morales y colaboradores (2011) llevaron a cabo un estudio detallado de arqueointensidad y magnetismo de rocas en materiales cocidos en un horno artesanal mexicano siguiendo las técnicas tradicionales con el fin de reproducir fielmente piezas arqueológicas de esta región de Mesoamérica y, de esta manera, conocer mejor el

mecanismo de magnetización de las piezas arqueológicas. En dicho estudio se obtuvo el perfil de temperatura de diferentes partes del interior del horno y se mejoró el conocimiento del proceso de manufactura de este tipo de cerámica precolombina.

También se han realizado estudios de arqueointensidad en cerámicas prehispánicas de distintos sitios arqueológicos del occidente de México como Tzintzuntzan (Morales et al. 2012) y El Opeño (Duran et al. 2010) con el fin de aportar datos para una curva maestra local y dar dataciones confiables para reconstruir la historia de estos sitios arqueológicos (Petronille et al. 2011, Morales et al. 2011).

5. Modelos de Variación Secular del Campo Magnético Terrestre

5.1 Introducción

Cuando se llevan a cabo estudios magnéticos con materiales arqueológicos se obtienen datos arqueomagnéticos. Estos datos permiten construir una Curva de Variación Paleo Secular (CVPS) para una región particular. Si la curva está suficientemente bien definida puede usarse como una herramienta de datación para sitios arqueológicos de la misma región (Aitken, 1990; Eighmy y Stenberg, 1990). Para determinar la fecha más probable del último uso que tuvo una pieza arqueológica se compara su magnetización remanente con la CVPS de referencia. Esta aproximación clásica para la datación arqueomagnética puede completarse con el uso de curvas de variación paleo secular generadas por modelos globales (Lodge y Holme, 2009) o regionales (Pavón-Carrasco *et al*, 2009).

La técnica clásica para la construcción de una Curva de Variación Paleo Secular requiere una alta densidad de datos concentrados en una región de aproximadamente 20 km². El uso de curvas sintéticas generadas por modelos geomagnéticos permite extender la técnica de datación arqueomagnética a regiones donde no hay suficiente densidad de datos para construir una CVPS clásica o donde existen vacíos significativos en su distribución temporal. En estos casos la herramienta clásica de datación arqueomagnética no puede aplicarse ya que proporciona datos con incertidumbres altas. Sin embargo, si el comportamiento del campo magnético está bien definido a escala continental donde se encuentra la región, se puede estimar una CVPS para la localidad arqueológica estudiada. Además, esta nueva aproximación permite la relocalización del error incluida cuando los datos se relocalizan con respecto a un punto de referencia y cuando el sitio a datarse también se relocaliza para compararlo con una CVPS.

Recientemente se han publicado modelos nuevos y refinados tanto globales como regionales para Europa, por lo que se ha implementado una nueva técnica como una herramienta rutinaria de datación de sitios arqueológicos. Pavón-Carrasco *et al* (2011)

siguieron el método dado por Lanos (2004) para obtener la edad más probable de una estructura arqueológica. En esa técnica se analizan las funciones de densidad de probabilidad estadística del campo geomagnético.

5.2 Curvas de Variación Secular

Para datar muestras arqueomagnéticas de edad desconocida se necesita una curva de variación paleosecular de referencia o **curva maestra**. Generalmente existen tres fuentes diferentes de CVPS arqueomagnéticas: la clásica CVPS regional determinada para un área específica (o país), modelos arqueomagnéticos regionales, y modelos globales.

5.2.1 Curvas regionales de variación paleosecular (aproximación clásica)

Los datos arqueomagnéticos bien datados para una región específica se trasladan a un lugar común (punto de referencia) para construir una CVPS. Si se asume un campo geomagnético dipolar ideal para trasladar los datos de un sitio arqueológico a un punto de referencia, el área no puede ser mayor a $2 \times 10^5 \text{ km}^2$. Los datos de dirección (declinación e inclinación) se transfieren por el método de Conversión Vía Polar (Noel y Batt, 1990) mientras que los datos de intensidad asociados se relocalizan calculando el Momento Dipolar Virtual Axial (VADM, por sus siglas en inglés) o simplemente Momento Dipolar Virtual (VDM). El procedimiento de relocalización introduce un error, que es independiente de las mediciones y aumenta con la distancia del sitio arqueológico al punto de referencia. Para los datos de dirección el error es de aproximadamente 7° cada 1700 km (Casas e Incoronato, 2007), y de aproximadamente $3\mu\text{T}$ cada 1000 km para datos de intensidad (Gómez-Paccard *et al*, 2008).

Se asume que para regiones pequeñas el error de relocalización está considerado en la incertidumbre paleomagnética, y no está considerado en los cálculos de propagación del error. Es importante notar que las curvas vecinas pueden mostrar características diferentes

que están relacionadas con la base de datos usada en la construcción de la curva (cantidad y calidad de datos) más que con la naturaleza del campo magnético.

En los últimos años se han hecho grandes esfuerzos para obtener CVPS detalladas para varios países (p.ej, Austria, Schnepf y Lanos, 2006; Bulgaria, Kovacheva *et al.*, 2009; Francia, Gallet *et al.*, 2002; Alemania, Schnepf y Lanos, 2005; Grecia, De Marco *et al.*, 2008; Hungría, Márton, 2010; España, Gómez-Paccard *et al.*, 2006; Italia, Tema *et al.*; 2006; el Reino Unido, Zananiri *et al.*, 2007; el oeste de Estados Unidos, Hagstrum y Blinman, 2010).

Es especialmente relevante el caso de Europa, donde se han actualizado recientemente muchas CVPS gracias a la alta densidad de datos arqueomagnéticos. Todas ellas se han construido usando la aproximación Bayesiana utilizada por Lanos (2004). Este método proporciona CVPS suaves y continuas para una región o país. Estas curvas generalmente abarcan 3000 años y contienen elementos direccionales (es decir, inclinación y declinación) del campo geomagnético.

Pavón-Carrasco *et al.* (2011) tomaron las CVPS publicadas originalmente y generaron un programa de Matlab. Dichas CVPS proporcionan un valor medio de un elemento del campo geomagnético (declinación o inclinación o intensidad) y su incertidumbre con un 95% de confianza. Además de las curvas maestras incluidas en el programa, la rutina de Matlab permite al usuario incluir su propia CVPS.

5.3 Modelos de referencia del Campo Geomagnético

5.3.1 Modelos regionales

Cuando los datos arqueomagnéticos están altamente concentrados en un área muy grande, como Europa, se desarrollan modelos regionales con datos *in situ*. Recientemente se ha publicado la primera generación de modelos regionales de Europa: SCHA.DIF.3K (Pavón-Carrasco, 2009) para los últimos 3000 años y SCHA.DIF.8K (Pavón-Carrasco, 2010) para el periodo 6000 a.C. al 1000 d.C. Estos modelos dan información de los tres elementos del

campo geomagnético (y sus incertidumbres con el 95% de confianza) para cualquier punto del continente europeo, el Norte de África y el Oeste de Asia.

El modelo SCHA.DIF.3K está basado exclusivamente en datos arqueomagnéticos, mientras que el modelo SCHA.DIF.8K está basado en datos arqueomagnéticos y registros de sedimentos lacustres. La inclusión de datos paleomagnéticos provenientes de sedimentos se hizo para subsanar la baja densidad de datos arqueomagnéticos disponibles del periodo 6000 a.C. al 1000 a.C. Las diferencias observadas en la suavidad las curvas resultantes de ambos modelos están relacionadas con el uso de registros sedimentarios anteriores al 1000 a.C.

Por medio del uso de modelos regionales para datar material arqueológico Pavón-Carrasco *et al* (2011) compilaron una CVPS sintética para el sitio de estudio, por lo que se ignoró el error de relocalización asociado con el traslado de los datos. Lo mismo aplicó para los modelos globales.

Otro beneficio importante que proporciona el uso de modelos regionales es la inclusión de una relación espacial entre los componentes del campo geomagnético, es decir, la ecuación de Laplace. Esto permite calcular una CVPS aun en regiones donde la densidad de datos arqueomagnéticos es baja como en el caso de Italia, o cuando las incertidumbres de los datos de que se dispone son altas y consecuentemente la CVPS Bayesiana es poco definida. Sin embargo, existen áreas donde las predicciones de los modelos regionales coinciden muy bien con las CVPS clásicas.

5.3.2 Modelos globales

Los modelos globales del campo geomagnético ofrecen información valiosa para mejorar el entendimiento de la dinámica del núcleo terrestre. La técnica de modelación aplicada ampliamente utiliza funciones esférico-armónicas y permite, bajo la premisa de una superficie libre (manto aislado), su aplicación desde o por arriba de la superficie terrestre hasta el límite núcleo-manto (CMB, por sus siglas en inglés) que es la región donde se origina el campo magnético terrestre.

Sin embargo las mediciones sistemáticas del campo geomagnético existen hace menos de 200 años, un intervalo de tiempo muy corto comparado con las escalas de tiempo de la variación secular.

Al conjunto completo de modelos globales que representan el campo geomagnético y su variación secular se han desarrollado para décadas recientes, como los modelos temporalmente continuos GSFC, CM3 o DGRF. Bloxham y Jackson (1992) utilizan para su modelo continuo UFM1 datos que van desde el inicio de las mediciones del campo geomagnético en 1840.

En el año 2000 Jackson *et al* completan la serie con medidas históricas de declinación e inclinación yéndose hasta el siglo XVI y desarrollan su propio modelo GUFM para los pasados 400 años comenzando en 1590 d.C. Para tiempos más antiguos sólo existen registros indirectos del campo preservado en muestras arqueológicas y paleomagnéticas en forma de magnetización remanente. Este tipo de datos tienen incertidumbres significativamente altas comparadas con los datos medidos directamente, esto debido a las suposiciones acerca de la forma de adquisición de la magnetización y, en particular, la datación de las muestras que es casi siempre problemática.

Las incertidumbres en el orden de unos cuantos años a décadas puede ser realista para las piezas arqueológicas o flujos de lava. Pero cuando se tiene que datar con radiocarbono o técnicas similares, las incertidumbres son del orden de siglos.

Sin embargo, a escala global, los modelos de tiempo promediado para intervalos de tiempo grandes han sido los principales objetos de estudio de Carlucci y Courtillot (1998), Johnson y Constable (1997), Kelly y Gubbins (1997), Schneider y Kent (1990), Hatakeyama y Kono (2002) entre otros.

Basados en datos arqueomagnéticos compilados por Daly y Goff (1996), Hongre *et al* (1998) producen un modelo esférico armónico de grado bajo del campo magnético de los últimos 3000 años. Johnson y Constable (1998) derivan un modelo de tiempo-promediado, ALS3K, a partir de ese conjunto de datos. Constable *et al* (2000) modelan instantáneas

(snapshots) globales individuales de 100 años. Hasta hace algunos años se comenzaron a hacer esfuerzos por extender los modelos globales no-promediados hacia atrás en el tiempo.

Los modelos de instantáneas muestran una evolución temporal coherente del campo, pero cualidades como el ajuste y la suavidad de cada modelo se eligieron meramente por la apariencia esperada o deseada del modelo para alguna de las épocas.

Existen muchos modelos globales del campo geomagnético para décadas recientes, pero son raros los modelos para varios siglos o milenios debido a la disponibilidad limitada de datos. Korte y Constable (2003) presentaron un modelo continuo esférico armónico para casi 3 mil años (del año 1000 a.C. al 1800 d.C.) fundamentado en una base de datos formada por arqueo direcciones y datos paleomagnéticos restringidos al eje dipolar: el CALS3K.1, modelo continuo arqueomagnético y paleomagnético de sedimentos lacustres, que puede utilizarse para predecir tanto el campo como su variación secular.

El modelo temporalmente continuo presentado por Korte y Constable (2003) modela de manera consistente el conjunto de datos por lo que se incrementa la confianza de estructuras que se modifican en el tiempo, lo que permite el estudio de la variación secular del campo magnético terrestre. También comparan los modelos continuos con las instantáneas y con el GUFM para los intervalos de tiempo traslapados. Se usa el error de análisis y las pruebas adicionales con los datos sintéticos para investigar el nivel de confianza de las características observadas en el modelo.

Las comparaciones y las pruebas con datos sintéticos permiten concluir que CALS3K proporciona una buena representación general de gran escala del campo geomagnético pero no reproduce estructuras de pequeña escala debido a su limitada resolución en regiones con baja densidad de datos.

En aplicaciones futuras puede utilizarse para compararlo con datos adicionales nuevos. Para regiones con mejor resolución, la coincidencia con los datos de CALS3K.1 puede darnos una idea de la compatibilidad general de los datos con el campo y la variación secular en una región del mundo. Para regiones con pocos datos o con datos pertenecientes

a intervalos de tiempo corto el modelo podría mejorarse mediante la iteración, la comparación y la inclusión de datos nuevos de alta calidad.

El modelo CALS3K.1 confirma los principales resultados de Constable *et al* (2000) a la vez que le otorga características más detalladas. El promedio de CALS3K.1 muestra dos flujos lobulares en el hemisferio Norte que aparecen de manera persistente en modelos históricos y en modelos paleomagnéticos de promedio temporales. El modelo CALS3K.1 alcanza una mayor calidad a partir de datos originales aunque Korte y Constable (2003) trabajaron con series suavizadas. Los datos arqueomagnéticos para cada una de las localidades generalmente no son de un solo sitio pero los resultados de las muestras de grandes regiones se redujeron a una sola localidad.

Para sedimentos lacustres la resolución temporal de las series de tiempo casi siempre eran mejores que 100 años, y para los intervalos arqueomagnéticos los intervalos eran irregulares. Korte y Constable (2003) creen que el modelo CALS3K.1 produce una representación general confiable de la variación secular y del flujo magnético en el límite manto-corteza pero no debe tomarse como una representación definitiva del campo magnético.

La modelación se vuelve menos robusta cuando los datos están más dispersos y los errores en los datos son grandes. La mejora del modelo debe ser un proceso iterativo. No hay una referencia absoluta para revisar la calidad de los datos pero se debe confiar en argumentos de consistencia regional. CALS3K.1 puede usarse para compararlo con series de tiempo arqueológico y paleomagnéticas.

Para áreas como Norteamérica, Europa, el noreste de Asia y la región Sur de Australia tienen una buena cobertura de datos, el modelo produce representaciones bastante confiables. Esto significa que los datos que no coinciden con las predicciones del modelo deberán estudiarse críticamente para aclarar por qué no coincide con la evolución general de una región y tomar en cuenta los problemas que se generan en la datación.

En aquellas regiones donde los datos sean poco densos se deberá tener reserva con las predicciones obtenidas. Sólo incluyendo datos adicionales en un modelo mejorado, se

podrán resolver las preguntas en donde difiera la evolución del campo y donde los datos existentes sean incompatibles con la representación global “suave” del modelo.

Korte y Constable (2008) evaluaron la resolución y la confianza de una familia de modelos geomagnéticos globales, CALSxK.n (Modelos Continuos de datos Arqueomagnéticos y de Sedimentos Lacustres para los pasados x miles de años). Esta familia proviene de datos arqueo y paleomagnéticos y da una descripción armónico-esférica de la variación temporal del comportamiento del campo magnético terrestre desde el año 5000 a.C.

Estos modelos pueden usarse para una gran variedad de estudios para entender mejor el geodinamo del núcleo terrestre, lo que permitirá la determinación eficiente de la influencia del campo geomagnético en las tasas de producción cosmogénica de núcleos. Estos modelos son similares a aquellos derivados a partir de observaciones satelitales modernas, datos de observatorios e históricos, pero su resolución espacial y temporal está limitada por su calidad y distribución. Korte y Constable (2008) encontraron que el poder espacial se resuelve completamente sólo con armónicos esféricos grado 4 y con una resolución temporal del orden de los 100 años.

Existen efectos de final significativos asociados al desarrollo temporal de los β -splines¹ que afectan algunas características de los modelos tanto en los primeros siglos como en los más recientes. Las incertidumbres de declinación, inclinación e intensidad del campo en las predicciones del modelo en general son menores a 2° y $1.5 \mu\text{T}$, respectivamente, pero pueden ser mayores a 8° y $5\mu\text{T}$ para ciertas épocas y regiones. Los estudios de resolución se completan con una presentación detallada del momento dipolar y de la inclinación del dipolo como lo predice el modelo CALS7K.2. Las características de gran escala se resuelven de manera más confiable que los detalles complejos de la estructura del campo y se utilizan, entre otras cosas, para el estudio de los cortes geomagnéticos rígidos de los isótopos cosmogénicos.

¹ β – spline es una línea polinómica suave básica, es decir, es una función que tiene el mínimo soporte (o conjunto de puntos donde la función es diferente de cero) con respecto a un determinado grado, suavidad y partición del dominio.

En uno de los primeros modelos (CAL3K.1) de esta familia se usaron datos de inclinación y declinación pero no de intensidad. Se aconsejó el desarrollo del dipolo axial en el modelo para escalarlo en un campo de intensidades apropiado y se usó una base de interpolaciones lineales de los Momentos Dipolares Axiales Virtuales (VADMs, por sus siglas en inglés). Consecuentemente, estos modelos en particular proporcionan estimaciones no-independientes del momento dipolar. Los datos usados en CAL3K.1 se limitaron a 24 series de tiempo suavizadas de observaciones reducidas a localidades comunes. En todos los modelos subsecuentes se usaron datos que iban siendo publicados; para datos arqueomagnéticos esto significa que no existen series de tiempo de sitios individuales y los datos están dispersos tanto en tiempo como en espacio.

El modelo CAL3K.2 fue el primer modelo que incluyó datos de arqueointensidad junto con datos de dirección y este modelo así como los subsecuentes proporciona una estimación de momento dipolar directamente de los datos. La distribución de los datos sigue igual que antes. Mientras que en la región de Europa existen muchos datos disponibles, los datos en el hemisferio Sur están particularmente dispersos. La distribución temporal de los datos es muy variable. La cantidad de datos globales aumenta significativamente para épocas posteriores al año 1000 d.C.

Tanto el grado máximo y el orden de los armónicos esféricos y el espaciamiento de los puntos nodales (*knot-points*) de los *splines* se eligieron para permitir una mejor resolución de la que se espera de los datos, asegurando que la estructura del modelo no se limite a los niveles de término o truncado.

De hecho, se usa una regulación motivada físicamente para asegurar la “suavidad” y simplicidad del modelo en tiempos y lugares donde los datos no proporcionen una resolución alta. El modelo se desarrolla haciendo un balance entre el ajuste de los datos, la “suave” estructura espacial del campo minimizando el flujo de calor en el límite núcleo-manto y un desarrollo “suave” en el tiempo por medio de la minimización de la segunda derivada temporal del campo. Para los modelos preferentes se elige el nivel de ajuste de los datos del valor esperado de χ^2 basados en las incertidumbres estimadas, las cuales tratan

de determinarse en un modo coherente para todo tipo de datos basados en la comprensión de sus posibles errores.

Mientras que en CALS3K.1 el dipolo axial no se determina directamente a partir de los datos sino que se aconseja el uso de un “factor de escala”, en modelos posteriores se obtiene directamente a partir de todos los datos incluyendo medidas de intensidad. De este modo, estos modelos proporcionan una estimación independiente del momento dipolar.

Korte *et al* (2009) presentaron una nueva generación de modelos globales para los últimos 3000 años usando diferentes bases de datos paleomagnéticos. Los nombraron los modelos CALS. Ahora pueden usarse tres modelos nuevos para obtener las componentes del campo geomagnético, incluyendo la incertidumbre al 65%, en cualquier punto de la Tierra. El primer modelo, llamado ARCH3K.1 se desarrolló usando solamente datos arqueomagnéticos. Este modelo abarca el mismo periodo de tiempo y coincide muy bien con el modelo regional para Europa SCHA.DIF.3K. Se usó una base de datos de sedimentos lacustres para obtener el segundo modelo: SED3K.1. Este modelo muestra un comportamiento altamente suavizado del campo geomagnético, por lo que no resulta la mejor opción para obtener datos arqueomagnéticos precisos. Sin embargo, el modelo puede usarse para correlacionarlo con otros datos de sedimentos. Finalmente, con la base de datos completa (datos arqueomagnéticos, flujos de lava y sedimentos lacustres se obtuvo el CALS3K.3

El modelo ARCH3K.1 es la mejor opción sobre otros modelos de datación arqueomagnética para Europa y Asia debido a que no merma por los datos de sedimentos lacustres. Sin embargo, el modelo CALS3K.3 sigue siendo la mejor representación del campo global aún para dataciones fuera de Eurasia.

6. Los sitios de estudio

6.1 Introducción

El Occidente de México es la subárea más extensa de Mesoamérica (ocupada por los actuales estados de Michoacán, Jalisco, Colima, Guerrero, Nayarit y Sinaloa), al igual que la más diversa ecológica y geográficamente (Williams, 2005). El Occidente es casi imposible de definir como una unidad con criterios físicos o biológicos, ya que se trata de un espacio de contacto y transición entre cinco regiones fisiográficas que incluyen un buen número de nichos ecológicos muy diversos y contrastantes (Jardel, 1994).

La naturaleza y complejidad de las culturas prehispánicas que se desarrollaron en el Occidente de México han sido objeto de múltiples debates, pero la vieja idea de que el occidente recibió la civilización como regalo desde el centro de México durante el periodo postclásico ya ha sido desechada. De la misma manera, la mayoría de los investigadores reconoce que el Occidente de México fue una región de varias áreas nucleares dentro del desarrollo global de Mesoamérica (Smith y Berdan, 2003).

En las últimas tres décadas, el ritmo de las investigaciones arqueológicas en Occidente se ha acelerado, y se han hecho descubrimientos arqueológicos notables; nuevos sitios y nuevas interpretaciones han demostrado la gran complejidad cultural en esta área durante la época prehispánica (Williams y Weigand, 2001; Williams *et al*, 2005)

La peculiar configuración del Occidente de México y su ubicación le otorgan un papel importante como un corredor a través del cual se difundieron ideas, por el que se movieron bienes materiales como la turquesa y el metal y por el que se desplazaron algunos grupos en sus migraciones, transformando las formas previas de vida (Schöndube, 1994).

6.2 Estudios arqueológicos en Michoacán

Han sido tan limitadas las investigaciones arqueológicas en el Occidente Mexicano que se sabe poco de las culturas pre tarascas que se desarrollaron en las cuencas lacustres de Michoacán. Los conocimientos no sobrepasan generalmente la definición de complejos culturales, cuya ubicación cronológica y espacial no es todavía definitiva (Pétrequin, 1994).

En Michoacán, la evolución cultural de las cuencas lacustres es relativamente paralela a la de la cuenca de México, pero no tan bien conocida y probablemente más tardía. Durante los siglos anteriores a la conquista, el Estado Tarasco, o Purhépecha, cuya última capital es Tzintzuntzan, se desarrolló alrededor de Zacapu y, luego, Pátzcuaro, mientras tomaban fuerza las culturas de la cuenca central de México. Todavía a inicios del siglo XVI, los ejércitos tarascos nunca habían sido vencidos por los ejércitos de la Triple Alianza.

6.3 Contexto Arqueológico de Las Lomas en la Cuenca de Zacapu

La cuenca lacustre de Zacapu pertenece al eje neovolcánico en el que se encuentran los más grandes lagos mexicanos, como los de Cuitzeo y Pátzcuaro, a 30 km al oeste y al sur de la cuenca, respectivamente; hacia el noroeste los de Chapala, Magdalena, San Marcos y Sayula y al sureste conforman el sistema de lagos de la planicie central mexicana.

La cuenca de Zacapu se halla mencionada varias veces en la *Relación de Michoacán*. Según esta fuente, Zacapu es el lugar que presenció los primeros episodios de la formación del Estado Tarasco antes de la fundación de las grandes capitales en la cuenca vecina de Pátzcuaro. Se consideraba como un centro religioso y poblacional de menor importancia pues estaba situado el borde del malpaís y de la gran meseta de lavas volcánicas que domina la orilla oeste. Los primeros españoles llegaron allí en 1524 y a partir de esta fecha comenzaron con el exterminio de su población y de las ciudades, acabando o reduciendo la evidencia del desarrollo y complejidad que se había alcanzado (Pétrequin, 1994; Espejel, 2013).

Tiempo sideral	Mesoamérica Occidental Periodos culturales mayores	Michoacán Zacapu Fases culturales	Centro de México Secuencia cultural general
1500	TARDÍO	(TZINTZUNTZAN)	TENOCHTITLAN
1250	POSTCLÁSICO	MILPILLAS	
1000	TEMPRANO	PALACIO	TULA
750	EPICLÁSICO	LUPE	(COYOTLATELCO)
500	CLÁSICO		
250		3	TEOTIHUACAN
	FINAL	LOMA ALTA 2	
d.C. a.C.			
250	PRECLÁSICO TARDÍO	----- 1	CUICUILCO
500			
750	PRECLÁSICO		Desarrollo de capitales regionales*
1000	MEDIO		
1250			
1500	PRECLÁSICO		Pueblos*
1750			
2000	TEMPRANO		
2250			Desarrollo de una economía agraria*
2500			
2750			
3000	Protocerámico		
3250			
3500			
3750			
4000			
4250			
4500	Precerámico		

**Figura 6.1 Cronología de la cuenca central de México y Norte de Michoacán (Zacapu).
Modificado de Niederberg 1987.**

El malpaís reagrupó una gran parte de la población postclásica de la cuenca supuestamente por razones de orden político y militar. Es una zona de derrame de lavas

ruiniformes. Zacapu se encuentra a la orilla de una pequeña extensión de agua, directamente alimentada por el gran manantial del malpaís que brota de las lavas; lleva el nombre de “Laguna de Zacapu”.

Cuando en 1983 un grupo de investigadores adscritos al Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (CEMCA) inició las investigaciones arqueológicas del Proyecto Michoacán en la ciénega de Zacapu, el Centro-Norte de este estado era prácticamente una tierra desconocida, y el Occidente de México en su conjunto era considerado todavía como una región aislada, apartada de la evolución general de Mesoamérica, de pasado sin gloria, con excepción del esplendor durante el postclásico del Estado Tarasco, la única entidad política que podía rivalizar con los aztecas y que había conservado todo su poder a la llegada de los españoles (Pétrequin, 1994).

Para algunos investigadores, el Estado Tarasco sólo pudo desarrollarse gracias a las aportaciones exteriores llegando a consolidarse hasta principios del Postclásico, bajo la influencia tolteca o durante la época clásica cuando ya se encuentran presentes los indicios de una influencia teotihuacana, sin embargo, esta concepción ha ido modificándose al conocerse mejor los datos arqueológicos de regiones como Zacapu, cuyos hallazgos han resultado de un alto nivel de complejidad. Ahora se sabe que el Occidente de México fue una subárea cultural de Mesoamérica tan importante como cualquier otra.

Una aportación importante del Proyecto Michoacán fue la propuesta de un nuevo esquema evolutivo y cronológico para esta zona del Occidente, con base en las excavaciones en el sector palustre y en el malpaís de la cuenca de Zacapu.

Los descubrimientos excepcionales de las tumbas de tiro de El Opeño datados como de finales del Preclásico inferior (1500-1300 a.C.) sorprendieron por su antigüedad. Esas excavaciones junto con las llevadas a cabo en Capacha, Colima, condujeron a rectificar la visión negativa que se tenía hasta entonces de la evolución general del Occidente de México.

Ahora se propone un origen *in situ* para los tarascos dentro de Michoacán, sin necesidad de buscar sus raíces en otras partes como se pensaba anteriormente. El estudio de

Las Lomas puso de manifiesto una larga secuencia de ocupación que se remonta un siglo antes de nuestra era (Preclásico superior).

Las excavaciones más importantes efectuadas hasta ahora en las Lomas fueron hechas en los sitios de Loma Alta y de Guadalupe. El primer sitio estuvo ocupado principalmente durante la fase Loma Alta, cuyos tres subperiodos se extienden de 100 a. C. hasta 550 d.C. La ocupación principal de Guadalupe es más tardía, puesto que corresponde a la fase Lupe, de 600 a 850 d.C.

El conjunto de las Lomas occidentales de la cuenca de Zacapu sólo representa el 2% de la totalidad del espacio estudiado por el CEMCA en el Centro-Norte de Michoacán; sin embargo, de los 70 sitios que fueron excavados y estudiados entre 1983 y 1987 en toda la región, 16 se encuentran en las Lomas, esto es, cerca del 23% (Arnauld *et al*, 1993).

6.3.1 Conjuntos funerarios en Las Lomas de Zacapu

Los sitios conocidos como Las Lomas en la ciénaga de Zacapu fueron ocupados aproximadamente los ocho primeros siglos de nuestra era, siendo después prácticamente abandonados. No se sabe si existían áreas habitacionales o caseríos, o si la gente iba a Las Lomas desde otro lugar únicamente para realizar actividades especializadas.

La abundancia de vestigios funerarios hace pensar en una ocupación especializada para estas actividades y para otras igualmente de tipo ritual, aunque es muy probable que la gente que iba a honrar a sus muertos a Las Lomas también explotara los recursos lacustres y palustres de éstas (Arnauld *et al*, 1993; Carot, 1994a).

Existe una cierta ambigüedad en los datos arqueológicos obtenidos hasta hoy en Las Lomas, pues no se han encontrado restos indiscutibles que indiquen una población sustancial viviendo en ese lugar; la mayoría de los hallazgos consisten en contextos funerarios.

Puede ser que la gente viviera en asentamientos dispersos alrededor de la ciénaga o en las partes altas de la misma, acudiendo a lugares como Loma Alta a sepultar a sus difuntos.

Este aparente sesgo en la información arqueológica es bastante común en el Occidente de México, pues desde el Formativo hasta el Clásico en Michoacán, Jalisco, Colima y Nayarit se han documentado muchos más conjuntos funerarios que sitios ocupacionales (Arnauld *et al*, 1993).

6.3.2 El conjunto de Loma Alta

Desde las primeras excavaciones realizadas en Loma Alta en 1983, la visión de este sitio cambió considerablemente al convertirse en un centro de importancia mayúscula no solamente para la historia purhépecha sino también a un nivel más amplio, mesoamericano.

La eminencia de Loma Alta es parte de un conjunto geográfico que es llamado Las Lomas constituido de pequeñas elevaciones esparcidas alrededor de la península de Jauja, en la ribera occidental de la antigua ciénega de Zacapu, la cual fue desecada artificialmente a principios del siglo pasado. En medio de este conjunto de unos 18 km² de superficie, Loma Alta ocupa una posición central; es también, como lo indica su nombre, el punto más alto ~6-7 m de altura total, natural y artificial, y el más grande, con más de 8 hectáreas de extensión.

De todo el sector de las Lomas, Loma Alta es en efecto la más alta; y ocupa, por lo demás una posición central entre todas las lomas. Si a estas dos características, elevación y centralidad, se añade la riqueza de descubrimientos arqueológicos, se comprueba la importancia de este antiguo establecimiento.

Loma Alta es un montículo artificial en posición central en las Lomas que requirió considerables trabajos de relleno; para ello fue necesario transportar una gran parte de los materiales, como las piedras de las construcciones, de las que carecen totalmente las Lomas. Loma Alta tenía una altura inicial en relación a los antiguos pantanos que la bordeaban. Fue realizada en el transcurso de su larga ocupación (1600 años) por una serie de

rellenos antrópicos que alcanzan entre 2 y 4 m de altura, hechos de barro mezclado con pequeños bloques o nódulos de tepetate y/o cinerita, con pequeñas piedras naturales o lascas de basalto pero sobre todo con vestigios antrópicos, esencialmente tepalcates (Arnauld *et al*, 1993, Carot y Fauvet-Berthelot, 1996).

Loma Alta es un sitio único en su tipo, un pueblo o centro ceremonial de una importancia excepcional en el plano sociopolítico y religioso. Los sistemas de construcción dan prueba de la movilización de una mano de obra importante y especializada. El material cerámico de este sitio refleja una gran calidad y un alto control técnico, además de una muy compleja iconografía que nunca fue superada en las fases posteriores, incluyendo a los propios tarascos (Arnauld *et al*, 1993).

Los hallazgos arqueológicos en Loma Alta evidenciaron costumbres funerarias insólitas y desconocidas hasta ahora en Occidente y Mesoamérica, como la cremación colectiva de osamentas humanas procedentes de antiguos entierros primarios re exhumados para este ritual, su reducción a polvo, su blanqueo con calcita y la introducción de esta mezcla con cucharas en recipientes, principalmente urnas, las cuales eran protegidas de toda contaminación externa por unos tapones de barro y por tapaderas, generalmente cajetes dispuestos boca abajo (Carot y Susini, 1989)

Las urnas fueron después enterradas en un lugar particular en el noroeste de la loma, el mismo durante los 500 años que duró este ritual (150 a.C.-350 d.C.). En una superficie de 12 m² se han encontrado un total de 28 urnas y tres cuencos con un total de 100 kg de cenizas. Conjuntamente a este ritual se realizaba otro que consistía en quebrar las ofrendas (cerámica en su mayoría) que acompañaban a las sepulturas antes de su cremación secundaria y cuyos fragmentos estaban enterrados junto con las urnas (Arnauld *et al*, 1993; Carot, 1993; Carot y Fauvet-Berthelot, 1996).

Si bien es cierto que la práctica de la cremación y de los entierros en urna está muy extendida en Mesoamérica, la del molido y reducción a polvo de huesos calcinados y su depósito en urnas parece particular de esta región (Carot, 1993; Arnauld *et al*, 1993).

Apareció también, en el transcurso de las diferentes temporadas de campo, una gran cantidad de elementos arquitectónicos de gran elaboración, en piedra labrada, como muros de contención, que reflejaba cierta monumentalidad pero que no se podía despejar por completo, siendo estos contenidos dentro de rellenos antrópicos muy gruesos y a una profundidad que varía entre 0.50 a 2.50 – 3 m. Durante las excavaciones extensivas llevadas a cabo en 1994 en la parte oriental de la loma, resaltaron aún más la monumentalidad de Loma Alta y la complejidad de su sistema constructivo. Existe además otro dato de gran relevancia que confirma la importancia del sitio: la larga secuencia de ocupación que remonta al final del Preclásico y sigue prácticamente sin *hiatus* hasta el Postclásico tardío, abarcando unos 1600 años (150 a.C. – 1450 d.C.) (Carot, 1994 b). En esta larga secuencia, se destacó una continuidad cultural en las manifestaciones materiales como ciertas técnicas y motivos decorativos (Carot, 1992) o ciertas prácticas funerarias (Pereira, 1996) que permite remitir a un origen mucho más antiguo (1000 años) la historia purépecha (Carot y Fauvet-Berthelot, 1996).

Loma Alta es una eminencia de 6 a 7 m de altura, en parte natural y en parte artificial, y de 6 a 8 ha de superficie, constituida en realidad de tres sectores, central, noreste y oriental:

- El sector central, el más importante, de 4 ha, de forma más o menos circular, en el cual se han concentrado todos los trabajos desde el principio; en su parte superior, se distinguen tres pequeñas elevaciones o “cumbres” al noroeste, Sur y este; tiene una altura artificial entre 2.50 y 4 m;
- El sector noreste, que constituye un apéndice en forma decreciente, de unas 2 ha de extensión y con aproximadamente 2 m de rellenos antrópicos;
- El sector oriental, al pie de la loma, que corresponde al emplazamiento del antiguo pantano que bordeaba la loma al este hasta el siglo V o VI de nuestra era y que, al secarse, fue rellenado progresivamente con 2 m de material.

El medio lacustre-palustre parece haber sido un lugar privilegiado para enterrar a los muertos. Según los purépechas, el lago de Pátzcuaro es la puerta al mundo de los muertos.

Además, dada su naturaleza insular, Loma Alta refuerza la idea de lugar privilegiado reservado a los muertos, pues es un lugar aislado del mundo de los vivos por el agua (Arnauld *et al*, 1993).

6.3.3 Secuencia de ocupación de Loma Alta

Etapas I y II, sector central

Al final de las dos primeras etapas de ocupación (100 a.C. – 250-350 d.C.) que corresponden a las fases cerámicas Loma Alta 1 y 2, los rellenos artificiales alcanzan 2 m de espesor. Estos rellenos estaban sellados por un piso de barro de unos 30 cm de grosor, muy bien conservado, y que fue extendido sobre toda la superficie de la loma en uso en esta época. Sobre este piso fueron construidas varias estructuras, evidenciadas por líneas de piedras o como plataformas.

Hacia el este, se descubrieron los vestigios de una estructura monumental bastante compleja en piedra con un aplanado de lodo muy duro como recubrimiento, constituida de una pequeña plataforma a la cual se subía por una escalera de cinco gradas y que permitía el acceso a la plataforma principal, más amplia de la cual sólo se conoce parte de los muros inferiores oeste y este construidos a cada lado de la pequeña plataforma de acceso, hechos con bloques grandes de piedra recubiertos también de lodo.

En etapas más recientes, la estructura monumental fue recubierta por muros de contención, uno de los cuales está construido justamente encima de la pared este-oeste de la plataforma principal. Precisamente al pie y al este de la escalera de esta estructura monumental se localizó la segunda fosa funeraria del sitio, también de etapa II. Presentaba las primeras sepulturas primarias conocidas del sitio con sus ofrendas completas.

Dentro de los límites de las excavaciones directamente o en fosas de profundidad variable cavadas en él, nueve sepulturas fueron despejadas, algunas en forma de botellón con arreglo de piedras, que anuncian las formas de entierro de las fases siguientes, Jarácuaro principio Lupe (Pereira, 1996); en medio de este conjunto había una sepultura en urna de un neonato, la primera conocida de esta época sin huellas de cremación. Esta área

funeraria estaba sellada por un piso de tierra apisonada de superficie blanquizca de 10 cm de grosor.

Etapa III, sector central y oriental

La etapa IIIa (350-450 d.C.) (Fase Loma Alta 3) está marcada por una elevación impresionante de la loma: un relleno de entre 1 y 2 m de espesor está extendido en una sola operación sobre toda la loma, nivelando entre sí las distintas áreas centrales y recubriendo todos los vestigios de las ocupaciones anteriores; para contener este relleno, se construyó un imponente sistema de muros de contención alcanzando hasta 1,70 m de altura.

Durante la etapa IIIb (fase Jarácuaro) (450 -550 d.C.) se inicia la extensión de la loma hacia el este, aprovechando el espacio dejado por el pantano que al principio existía al pie de la loma, en su lado oriental, y que se hubiera secado a partir del final de la segunda etapa de ocupación del sitio.

Etapa IV, sector central, noreste y oriental

Durante la etapa siguiente, etapa IV, que corresponde a la fase Lupe (550-850 d.C.), la loma está extendida hacia el noreste, con un relleno homogéneo de más de 1.50 m de grosor y realzada en la parte oriental y en la parte baja de lo que fue el antiguo pantano, recubriendo los rellenos de etapa IIIb. Toda una serie de muros de contención de menor altura que los de la etapa anterior fue construida para contener los nuevos rellenos (de unos 50 cm de espesor) de la ladera oriental de la loma.

Etapa V, sector central y oriental

La etapa final de ocupación, etapa V, corresponde a la ocupación postclásica (1200-1450 d.C.) (Fase Milpillas); se evidenció principalmente en la parte alta oriental de la loma, con una concentración muy marcada de material característico de esta época pero, según parece, sin vestigios arquitectónicos asociados, siendo estos probablemente destruidos desde mucho tiempo atrás porque se encontraban casi en la superficie.

En la parte noroeste, la zona funeraria fue reocupada, como lo demuestra la presencia de una urna de gran tamaño con tapadera que contenía los restos de una sepultura sin huellas de la cremación característica de los entierros postclásicos, introducida en una fosa a unos metros de los antiguos depósitos de urnas cinerarias (Carot y Fauvet-Berthelot, 1996).

6.3.4 Dataciones de carbono 14 disponibles para Loma Alta.

Considerar las dataciones por carbono 14 tiene relevancia cuando se considera que la arqueología y las dataciones por carbono 14 tienen décadas de desarrollo conjunto (Buck et al., 1991), y que la información derivada del carbono 14 tiene décadas de ser publicada, además de que una de las características evidentes del comportamiento en la intensidad de campo geomagnético es que, para un valor dado de parámetro de campo paleo geomagnético se puede repetir varias veces en un periodo de tiempo determinado, como se puede observar en los modelos más recientes de variación secular ej. Pavón-Carrasco et al, 2011, los cuales calculan varios intervalos de tiempo para un valor dado de los parámetros magnéticos. Se consideran entonces para restringir los intervalos de tiempo posibles dado un valor específico de parámetro geomagnético.

De *Arqueología de las lomas en la cuenca lacustre de Zacapu, Michoacán*, de Arnauld *et al*, 1998, se tomaron las siguientes dataciones por carbono 14, INAH 331, INAH 330, INAH 708, INAH 705, INAH 706, INAH 707, INAH 715, INAH 710, las cuales abarcan el periodo **[100a.C. – 600 d. C.]**. El material datado por el método de carbono 14 fue tomado del Sitio Loma Alta, y por lo tanto están relacionadas con el sondeo 14 (S14) y con el sondeo 2 (S2), de estos sondeos fueron obtenidos los tiestos estudiados en esta tesis.

6.3.5 Las muestras y su preparación

Se investigaron 20 tiestos -material típico para la determinación de arqueointensidad- proporcionados por arqueólogos, provenientes de los sondeos 14 (S14) y 2 (S2) del Conjunto funerario de Loma Alta, en un contexto ceremonial/funerario que permitió obtener una datación de carbono catorce a material asociado a la cerámica que sitúa a estos

tiestos en el intervalo de tiempo [100a.C. – 600 d. C.] (Arnauld *et al*, 1993). De cada tiesto se obtienen 6 cortes que se orientan en un sistema cartesiano de referencia arbitrario, con la finalidad de corregir o disminuir el efecto de una posible anisotropía de termo remanencia (Morales *et al*, 2012, 2013, 2015), por lo tanto se obtuvieron 120 especímenes, a los cuales se les dividió en tres series por razones de capacidad del horno ASC TD48 con el que se trabajó. Las cuales se exhiben en las Tabla 6.1

Los especímenes se logran embebiendo los cortes del tiesto, de 1cm cúbico aproximadamente, en sal pulverizada y comprimiendo con ayuda de una prensa de 20 toneladas en un cilindro de metal no magnético diseñado específicamente para este fin. De esta manera se obtienen cilindros de sal de 2.54 cm de diámetro y 2 cm de alto, lo cual es un requerimiento del magnetómetro AGICO JR6 con el que se realizaron todas las mediciones de magnetización remanente.

Tabla 6.1 Relación de las tres series de Zacapu de los tiestos investigados

Relación de tiesto. (CEMCA, Mich 66) Zacapu Serie 1		
S14 BCDE Niv1		A
		B
S14 BCDE Niv2		A
		B
S14 BCDE Niv3		A
		B
S14 BCDE Niv4		A
		B

Relación de tiestos. (CEMCA, Mich 66) Zacapu Serie 2		
S14 BCDE Niv5		A
		B
		C
S14 BCDE Niv6		A
		B
		C
S14 BCDE Niv7		A
		B
		C
S14 BCDE Niv8		A
		B
		C
S14 E Niv10		A
		B
S14 E Niv11		A
		B
S14 E Niv12		A
S14 E Niv13		A
		B
		C

Relación de tiestos. (CEMCA, Mich 66) Zacapu Serie 3		
S14 E Niv14		A
		B
		C
		D
		E
S2 CD Niv1		A
S2 CD-AB Niv2		A
		B
		C
S2 AB Niv1		A
		B
		C

6.3.6. Análisis de Magnetismo de Rocas

Con el fin de conocer las componentes de la magnetización natural remanente además de preseleccionar a los candidatos apropiados para mejorar el éxito en las determinaciones de arqueointensidad (Dunlop, 2011), se desmagnetizó con campos alternos un piloto de cada tiesto recibido de los arqueólogos, a fin de estimar por medio del vector de magnetización remanente su viabilidad para la determinación de intensidades. Además se llevó a cabo experimento de variación continua de la susceptibilidad magnética con la temperatura (Goguitchaichvili et al, 2001), con el fin de conocer al mineral portador de la magnetización natural remanente a través de la temperatura de Curie (T_c) representativa, y de conocer la reversibilidad o no de los tiestos. En la Tabla 6.2 se muestran los resultados de dichos análisis del material investigado.

Tabla 6.2 Temperaturas de Curie y MDF (median destructive field) obtenidos para las muestras procesadas

Serie 1	T_c (°C)	MDF (mT)	Serie 2	T_c (°C)	MDF (mT)	Serie 3	T_c (°C)	MDF (mT)
S14 BCDE Niv 1 (A)	547	47	S14 BCDE Niv 5 (A)	576	30	S14 E Niv14 (B)	526	40
S14 BCDE Niv 1 (B)	479	51	S14 BCDE Niv 6 (A)	538	27	S2 CD-AB Niv2 (B)	506	44
S14 BCDE Niv 2 (A)	549	23	S14 BCDE Niv 7 (A)	572	41	S2 AB Niv1 (A)	594	23
S14 BCDE Niv 2 (B)	457	56	S14 BCDE Niv 8 (C)	578	47	S2 CD Niv1 (A)	574	43
S14 BCDE Niv 3 (A)	548	38	S14 E Niv 10 (B)	558	54			
S14 BCDE Niv 3 (B)	546	36	S14 E Niv 11 (A)	516	63			

S14 BCDE Niv 4 (A)	570	44	S14 E Niv 12 (A)	570	53			
S14 BCDE Niv 4 (B)	600	49	S14 E Niv 13 (B)	514	27			

Las temperaturas de Curie calculadas con la segunda derivada de las curvas κT (Tauxe, 1998), exhiben contenido de titanomagnetitas pobres en titanio (Hunt et al., 1995), las curvas de calentamiento y enfriamiento son razonablemente reversibles, lo que evidencia una alta estabilidad térmica en estas muestra, mientras que los MDF's (median destructive field) nos indican coercitividades de medias, $22\text{mT} \leq \text{MDF} \leq 38\text{mT}$, en el 35% de las muestras; a coercitividades altas $40\text{mT} \leq \text{MDF} \leq 63\text{mT}$, en el 65% de las muestras.

6.3.7 Determinaciones de arqueointensidades

La determinación de intensidades fue realizada utilizando el método de Thellier y Thellier, (1959), modificado por Coe, (1967). Los calentamientos y enfriamientos fueron hechos en un horno ASC TD48 y las mediciones de magnetizaciones remanentes fueron realizadas con magnetómetro de giro AGICO JR6, el campo de laboratorio aplicado fue de $40 \mu\text{T}$. En dirección +z. Se aplicaron 13 pasos de incremento de temperatura los cuales fueron distribuidos entre los 100°C y 560°C . Con calentamientos sin campo conocidos como 'pTRM checks' realizados cada tercer paso de doble calentamiento a todo lo largo del proceso. Se llevaron a cabo dos pasos sin campo a 350°C y 475°C denominados tail check's, con el fin de evaluar un posible estado de multidominio magnético. (Riisager y Riisager, 2001). Con el objetivo de cuantificar la diferencia entre enfriar con ayuda de un ventilador –como se hace actualmente en laboratorio- y enfriar sin ayuda de uno, como se hizo al momento de la fabricación de la cerámica, se realizó un experimento al final de la determinación de arqueointensidades, denominado “cooling rate (CR)” propuesto por Chauvin et al. 2000, y acondicionado e implementado por Morales et al, 2007, 2009. 2011, 2012, 2013, 2015, el cual consta de tres calentamientos más, con campo aplicado, a la temperatura más alta alcanzada en el experimento de determinación de intensidades, los

cuales son en este caso 40 μT y 560 $^{\circ}\text{C}$, en el primero denominado TRM_{R1} , las muestras se enfrían con ayuda de un ventilador, en el segundo denominado TRM_L , las muestras se enfrían sin ayuda de un ventilador en un tiempo aproximado de 6 horas, finalmente en un paso denominado TRM_{R2} , se calientan nuevamente y se enfrían con ayuda de un ventilador, con los valores de magnetización obtenidos en los tres pasos antes descritos se calculan 2 cocientes, el primero para evaluar un posible cambio termoquímico denominado factor de transformación $f_{tr} = \frac{\text{TRM}_{R2}}{\text{TRM}_{R1}}$, si y solo si, el factor de transformación no excedió el 15% de variación, entonces se aplica la corrección utilizando el factor de corrección, $f_{cr} = \frac{\text{TRM}_{R1}}{\text{TRM}_L}$, y este factor solo se aplica cuando la corrección no excede el 15%, pues de lo contrario se podría pensar en un comportamiento artificioso y no natural.

Los resultados obtenidos en la determinación de arqueointensidad se sometieron a discriminación, según los siguientes criterios de aceptación:

- 1) aquellos especímenes en cuyo diagrama de Arai (Nagata, 1963) es posible apreciar un comportamiento lineal, i.e., que no presentara concavidad hacia arriba, lo cual es evidencia de un posible multidominio (Levi, 1977), en un segmento que contenga al menos 5 puntos para su evaluación cuantitativa,
- 2) que la fracción de la NRM fuese superior a 70%, i.e., f (Coe, 1978) ≥ 0.7 ;
- 3) que el parámetro de confianza q (Coe, 1978) tuviese un valor de al menos 5;
- 4) que los diagramas de Zijdeveld (Zijdeveld, 1967) fuesen colineales al origen;
- 5) que los pTRM checks no tuviesen una desviación superior al 10%. Aquellos resultados que cumplieron con los criterios antes descritos fueron aceptados.

Las figuras 6.2 y 6.3 muestran los diagramas de Arai (Nagata, 1963) y Zijdeveld (1967) representativos de los especímenes que se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta con los criterios antes descritos.

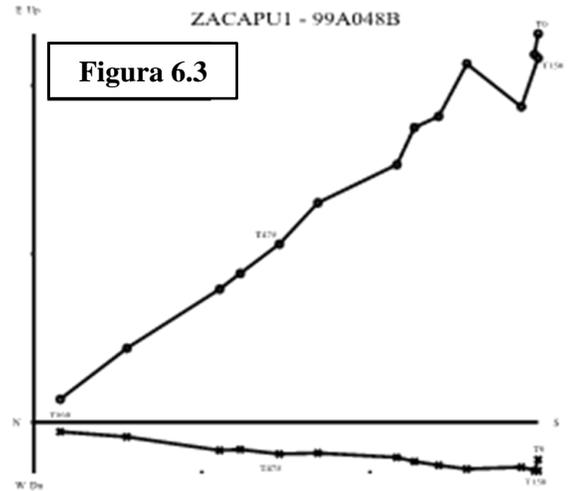
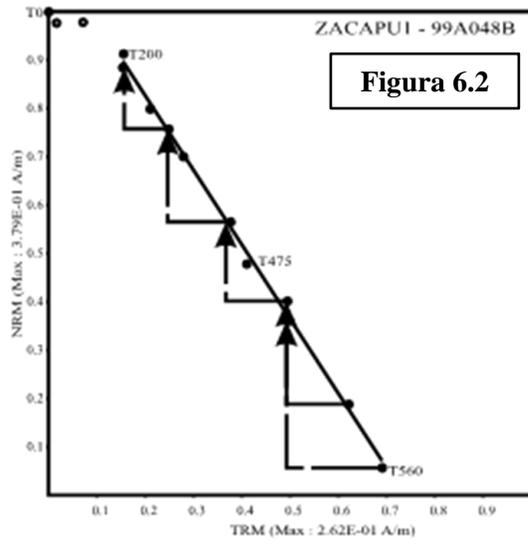


Figura 6.2 Diagramas de Arai (Nagata, 1963), Figura 6.3 Diagrama de Zijdeveld (1967) de los casos representativos de los especímenes aceptados para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

También se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta los especímenes que presentaban dos componentes del vector de magnetización, sin embargo, se adaptaron los estadísticos de calidad, para tomar a éstos en consideración. En el diagrama de Arai de estos especímenes es posible apreciar un comportamiento lineal en un segmento que contiene al menos 5 puntos. Que el parámetro de confianza q (Coe, 1978) ≥ 3 . En este tipo de especímenes se aceptó que $0.7 \geq f$ (Coe, 1978) ≥ 0.3 , sin embargo la intensidad del campo geomagnético antiguo calculada en estos especímenes es cercano a la del promedio de la muestra, por lo tanto fueron aceptados, además los diagramas de Zijdeveld presentan un segmento final del vector de magnetización colineal al origen. Las figuras 6.4 y 6.5 muestran los diagramas de Arai (Nagata, 1963) y Zijdeveld (1967) de los especímenes con las características antes descritas.

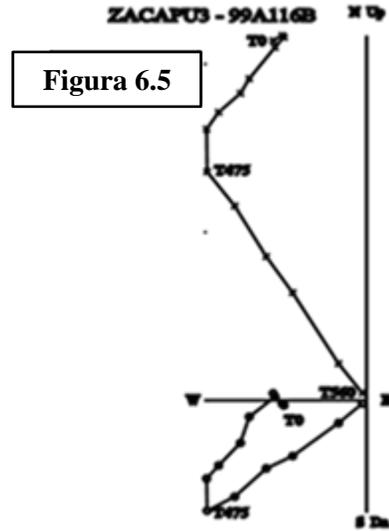
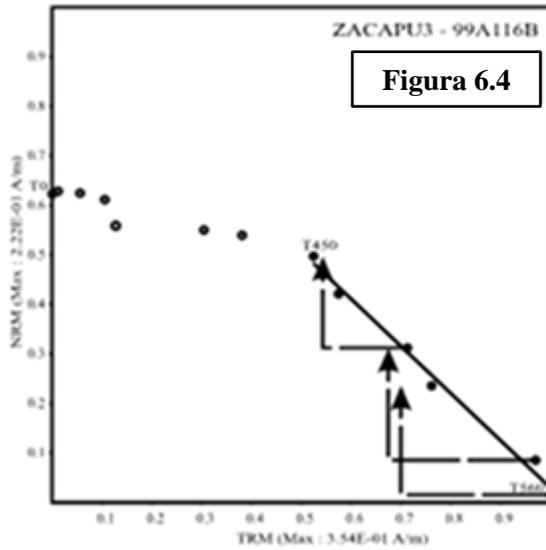


Figura 6.4 Diagramas de Arai (Nagata, 1963), Figura 6.5 Diagrama de Zijderveld (1967) de los casos representativos de los especímenes con 2 componentes que aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

Los especímenes no aceptados muestran en los diagramas de Arai un comportamiento no lineal o un posible comportamiento lineal. Los diagramas de Zijderveld de estos especímenes en general no son colineales al origen, y las proyecciones estereográficas no están agrupadas a un punto, sino que de hecho siguen en círculo, lo que sugiere un cambio termoquímico inducido en laboratorio por los calentamientos a los que se someten las muestras. Las figuras 6.6, 6.7 y 6.8 exhiben los comportamientos descritos antes.

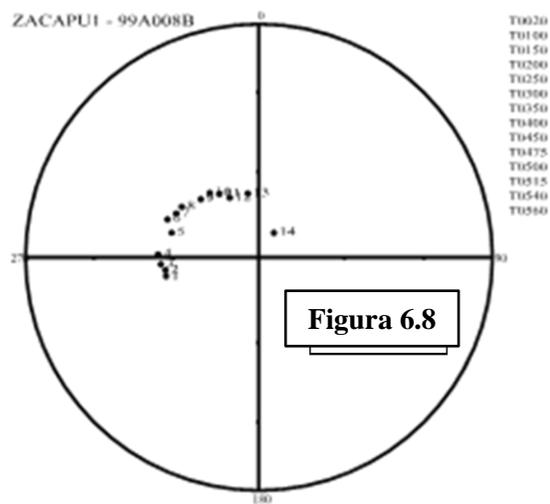
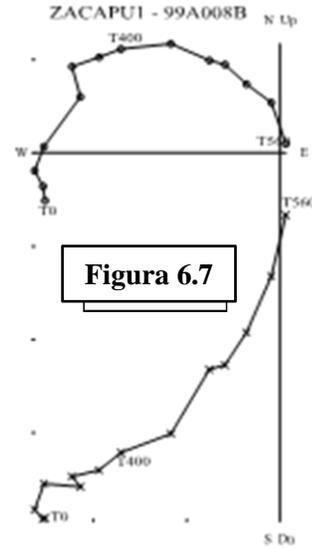
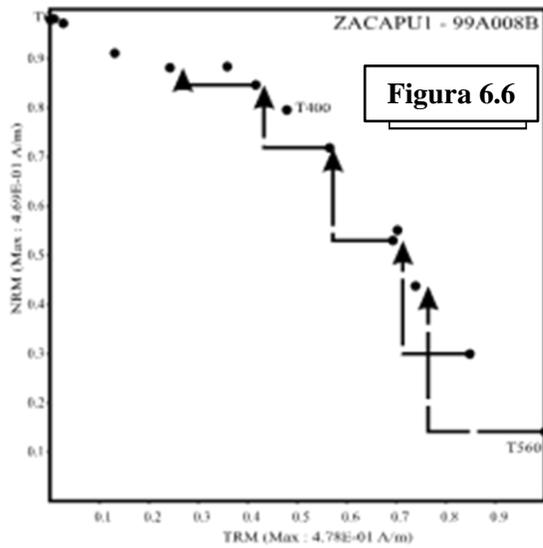


Figura 6.6 Diagramas de Arai (Nagata, 1963), Figura 6.7 Diagrama de Zijdeveld (1967) y Figura 6.8 Proyección estereográfica de los casos representativos de los especímenes que no se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

Aplicando los criterios de discriminación antes descritos se calcularon las intensidades de los especímenes y se promediaron para obtener la intensidad del tiesto. En

las tablas 6.3, 6.4 y 6.5 que a continuación se exhiben, se muestran los resultados de los cálculos.

Tabla 6.3. Resultado de arqueointensidades, T_1 - T_2 : intervalo de temperatura usado para los cálculos, f : fracción de NRM usada en la determinación, g : factor de espaciamento, q : factor de calidad; tomados de Coe (1978), n : número de pasos que intervienen en los cálculos, H_{cruda} : arqueointensidad no corregida, H_{corr} : arqueointensidad corregida con el ritmo de enfriamiento. **SR**: Sin Resultado

Tiestos de Loma Alta. Zacapu, Michoacán. (CEMCA, Mich 66) Serie 1												
Muestra	Espécimen	T_1 - T_2 [°C]	n	H_{cruda} [μT]	F	g	q	Promedio [μT]	Desv. Est. [μT]	H_{corr} [μT]	Promedio [μT]	Desv. Est. [μT]
S14 BCDE Niv1 A	99A001B	[250,560]	10	65.41	0.757	0.838	14.6	63.3	7.5	65.90	63.0	6.1
	99A002B	[250,560]	10	67.72	0.857	0.857	26.8			67.24		
	99A003B	[250,560]	10	67.03	0.770	0.867	19.0			65.94		
	99A004B	[250,560]	10	64.46	0.731	0.854	19.3			63.98		
	99A005B	[300,560]	9	52.28	0.572	0.860	12.0			52.21		
	99A006B	[300,560]	7	51.25	0.373	0.783	2.6			51.17		
S14 BCDE Niv1 B	99A007B			S/R								
	99A008B			S/R								
	99A009B			S/R								
	99A010B			S/R								
	99A011B			S/R								
	99A012B			S/R								
S14 BCDE Niv2 A	99A013B			S/R								
	99A014B			S/R								
	99A015B			S/R								
	99A016B			S/R								
	99A017B			S/R								
	99A018B			S/R								
S14 BCDE Niv2 B	99A019B			S/R								
	99A020B			S/R								
	99A021B			S/R								
	99A022B			S/R								
	99A023B			S/R								
	99A024B			S/R								
S14 BCDE Niv3 A	99A025B	[450,560]	6	38.19	0.497	0.777	3.2	38.1	2.9	37.90	34.3	2.8
	99A026B	[450,560]	5	33.72	0.464	0.718	6.2			33.33		
	99A027B	[450,560]	5	36.34	0.467	0.713	5.4			35.86		
	99A028B	[450,560]	4	31.20	0.367	0.586	1.7			30.85		
	99A029B	[450,560]	5	31.79	0.458	0.695	7.2			31.55		
	99A030B	[450,560]	5	37.23	0.378	0.677	3.9			36.73		
S14 BCDE Niv3 B	99A031B	[350,560]	8	48.40	0.581	0.828	8.3	45.8	3.9	47.67	45.7	4.0
	99A032B	[350,560]	6	45.12	0.555	0.756	8.9			44.43		
	99A033B	[450,560]	5	47.13	0.403	0.656	3.5			47.47		
	99A034B	[350,560]	8	51.65	0.595	0.813	6.5			51.80		
	99A035B	[500,560]	4	41.68	0.275	0.558	1.1			41.71		
	99A036B	[450,560]	6	41.37	0.415	0.749	3.7			41.44		
S14 BCDE Niv4 A	99A037B	[300,560]	8	49.60	0.712	0.826	21.6	49.7	1.6	49.15	50.8	1.6
	99A038B	[300,560]	8	51.01	0.684	0.828	20.0			50.63		
	99A039B	[300,560]	8	49.43	0.680	0.825	18.9			49.09		
	99A040B	[300,560]	8	52.28	0.662	0.825	21.1			51.71		
	99A041B	[300,560]	9	49.00	0.680	0.831	19.2			48.56		

	99A042B	[300,560]	8	47.44	0.671	0.810	19.2			47.02		
S14 BCDE Niv4 B	99A043B	[0 , 150]	11	60.39	0.762	0.871	16.7	58.8	1.8	59.67	58.2	1.9
	99A044B	[0 , 150]	11	57.82	0.790	0.870	16.1			56.87		
	99A045B	[0 , 150]	10	57.00	0.697	0.848	15.2			56.51		
	99A046B	[0 , 150]	11	56.97	0.790	0.868	31.2			56.70		
	99A047B	[0 , 150]	11	59.02	0.790	0.877	25.9			58.58		
	99A048B	[0 , 150]	11	61.56	0.741	0.863	34.1			61.19		

Tabla 6.4. Resultado de arqueointensidades, T_1 - T_2 : intervalo de temperatura usado para los cálculos, f : fracción de NRM usada en la determinación, g : factor de espaciamiento, q : factor de calidad; tomados de Coe (1978), n : número de pasos que intervienen en los cálculos, H_{cruda} : arqueointensidad no corregida, H_{corr} : arqueointensidad corregida con el ritmo de enfriamiento. **SR**: Sin Resultado

Tiestos de Loma Alta. Zacapu, Michoacán. (CEMCA, Mich 66) Serie 2												
I	Espécimen	T_1 - T_2 [°C]	n	H_{cruda} [μT]	F	g	q	Promedio [μT]	Desv. Est. [μT]	H_{corr} [μT]	Promedio [μT]	Desv. Est. [μT]
S14 BCDE Niv5 A	99A0049B	[350,560]	8	44.28	0.694	0.814	8.4	44.2	1.8	44.61	44.0	1.6
	99A0050B	[350,560]	8	44.19	0.719	0.820	7.6			43.88		
	99A0051B	[350,560]	8	45.80	0.696	0.804	6.5			45.06		
	99A0052B	[300,560]	8	45.82	0.602	0.798	6.2			45.47		
	99A0053B	[300,560]	9	44.49	0.717	0.853	7.7			44.43		
	99A0054B	[300,560]	8	40.88	0.618	0.825	7.7			40.82		
S14 BCDE Niv6 A	99A0055B	[250,560]	10	46.67	0.735	0.861	18.1	43.7	2.1	46.31	43.0	2.16
	99A0056B	[300,560]	9	43.95	0.687	0.844	11.7			43.26		
	99A0057B	[300,560]	8	44.22	0.539	0.819	8.3			42.46		
	99A0058B	[250,560]	10	44.68	0.748	0.863	16.4			44.13		
	99A0059B	[250,560]	9	40.49	0.602	0.837	16.7			39.80		
	99A0060B	[250,560]	9	42.24	0.613	0.840	14.1			42.27		
S14 BCDE Niv7 A	99A0061B	[250,560]	10	49.42	0.795	0.860	8.5	49.7	1.5	48.53	48.5	1.3
	99A0062B	[250,560]	10	48.82	0.800	0.860	8.1			48.66		
	99A0063B	[250,560]	10	49.19	0.791	0.859	9.1			48.86		
	99A0064B	[250,560]	10	49.47	0.789	0.857	8.4			48.84		
	99A0065B	[250,560]	9	51.89	0.666	0.849	8.5			50.17		
	99A0066B	[250,560]	9	47.07	0.738	0.809	11.0			45.97		
S14 BCDE Niv8 C	99A0067B	[250,560]	10	63.91	0.801	0.855	13.3	61.5	2.5	63.65	61.1	2.5
	99A0068B	[300,560]	9	60.83	0.726	0.835	9.5			60.33		
	99A0069B	[250,560]	10	63.98	0.794	0.861	10.4			63.76		
	99A0070B	[300,560]	9	62.28	0.717	0.839	8.0			61.93		
	99A0071B	[300,560]	9	57.28	0.701	0.840	9.0			56.82		
	99A0072B	[250,560]	9	60.87	0.638	0.830	10.3			60.57		
S14 E Niv10	99A0073B	[350,560]	8	64.41	0.634	0.808	6.4	65.3	1.4	63.91	64.6	1.4
	99A0074B	[350,560]	8	66.66	0.621	0.818	6.3			65.89		

B	99A0075B	[350,560]	8	65.83	0.634	0.811	5.7			64.96		
	99A0076B	[350,560]	8	67.37	0.623	0.814	5.4			66.62		
	99A0077B	[350,560]	7	63.76	0.476	0.790	5.0			63.28		
	99A0078B	[350,560]	8	64.07	0.636	0.810	6.2			63.21		
S14 E Niv11 A	99A0079B	[150,560]	12	59.71	0.862	0.889	15.0	60.9	1.2	58.82	60.7	1.5
	99A0080B	[150,560]	12	61.36	0.855	0.887	16.2			60.42		
	99A0081B	[150,560]	12	63.11	0.861	0.891	16.6			63.57		
	99A0082B	[150,560]	12	60.86	0.878	0.892	15.5			61.05		
	99A0083B	[150,560]	11	60.71	0.812	0.867	11.5			60.75		
	99A0084B	[150,560]	11	60.06	0.773	0.851	13.2			60.16		
S14 E Niv12 A	99A0085B	[475,560]	5	40.10	0.436	0.681	1.9	36.9	3.3	39.73	36.6	3.3
	99A0086B	[450,560]	6	32.90	0.462	0.737	3.3			32.66		
	99A0087B	[450,560]	6	40.12	0.459	0.751	3.6			39.84		
	99A0088B	[450,560]	5	32.98	0.275	0.644	1.7			32.62		
	99A0089B	[475,560]	5	36.86	0.389	0.680	1.8			36.53		
	99A0090B	[500,560]	4	39.00	0.236	0.580	0.7			38.65		
S14 E Niv13 B	99A0091B	[300,560]	9	47.05	0.659	0.830	7.1	45.0	2.5	46.49	44.6	2.5
	99A0092B	[400,560]	7	45.44	0.618	0.810	4.4			44.69		
	99A0093B	[350,560]	8	47.02	0.629	0.818	5.1			46.62		
	99A0094B	[400,560]	7	47.21	0.626	0.808	4.0			46.98		
	99A0095B	[400,560]	7	42.40	0.658	0.810	4.8			42.09		
	99A0096B	[400,560]	7	41.40	0.602	0.799	3.7			41.15		

Tabla 6.5. Resultado de arqueointensidades, T_1 - T_2 : intervalo de temperatura usado para los cálculos, f : fracción de NRM usada en la determinación, g : factor de espaciamento, q : factor de calidad; tomados de Coe (1978), n : número de pasos que intervienen en los cálculos, H_{cruda} : arqueointensidad no corregida, H_{corr} : arqueointensidad corregida con el ritmo de enfriamiento. SR: Sin Resultado

Tiestos de Loma Alta. Zacapu, Michoacán. (CEMCA, Mich 66) Serie 3												
Muestra	Espécimen	T_1 - T_2 [°C]	n	H_{cruda} [μ T]	F	g	q	Promedio [μ T]	Desv. Est. [μ T]	H_{corr} [μ T]	Promedio [μ T]	Desv. Est. [μ T]
S14 E Niv14 B	99A097B	SR						44.3	2.7		44.2	2.6
	99A098B	[250,560]	9	48.54	0.743	0.865	9.1			48.34		
	99A099B	[250,560]	9	45.06	0.740	0.855	10.5			44.88		
	99A100B	[250,560]	9	44.56	0.735	0.855	10.3			44.32		
	99A101B	[250,560]	9	41.79	0.745	0.862	12.4			41.81		
	99A102B	[250,560]	9	41.88	0.713	0.856	9.9			41.87		
S2 CD-AB Niv2 B	99A103B	[400,560]	8	54.02	0.666	0.827	5.9	56.7	5.64	53.20	56.25	5.5
	99A104B	[400,560]	8	65.75	0.691	0.829	7.6			65.09		
	99A105B	[400,560]	8	56.46	0.642	0.827	10.6			55.78		
	99A106B	[400,560]	8	56.79	0.640	0.825	6.7			56.52		
	99A107B	[400,560]	8	48.57	0.644	0.818	11.4			48.49		
	99A108B	[400,560]	8	58.58	0.641	0.820	14.7			58.40		
S2 AB Niv1 A	99A109B	[250,560]	9	37.85	0.729	0.849	12.5	36.7	1.4	37.85	36.0	1.8
	99A110B	[250,560]	9	37.96	0.741	0.848	13.5			37.95		
	99A111B	[250,560]	9	36.21	0.729	0.851	16.2			36.02		

	99A112B	[250,560]	9	34.16	0.714	0.848	11.3			33.68		
	99A113B	[250,560]	9	37.71	0.713	0.845	19.8			36.81		
	99A114B	[250,560]	7	36.61	0.672	0.822	6.02			34.23		
S2 CD Niv1 A	99A115B	SR						36.5	2.4		36.6	2.4
	99A116B	[450,560]	6	38.11	0.476	0.748	6.9			37.98		
	99A117B	[450,560]	6	33.13	0.487	0.723	6.0			33.09		
	99A118B	[450,560]	6	34.99	0.496	0.759	8.1			35.18		
	99A119B	[450,560]	6	39.20	0.483	0.763	6.0			39.43		
	99A120B	[450,560]	6	37.34	0.492	0.770	5.4			37.40		

Se compararon las arqueointensidades con el modelo SHADIF.14k (Pavón-Carrasco *et al*, 2011), el cual es un modelo global que considera exclusivamente datos arqueomagnéticos y que se puede adaptar, (utilizando un código en el programa Matlab®) a la región geográfica de donde se obtuvieron las muestras arqueológicas. De este modo se obtuvieron intervalos de tiempo para los resultados obtenidos de arqueointensidad, considerando las dataciones de carbono 14 con las que se contaba para este sitio.

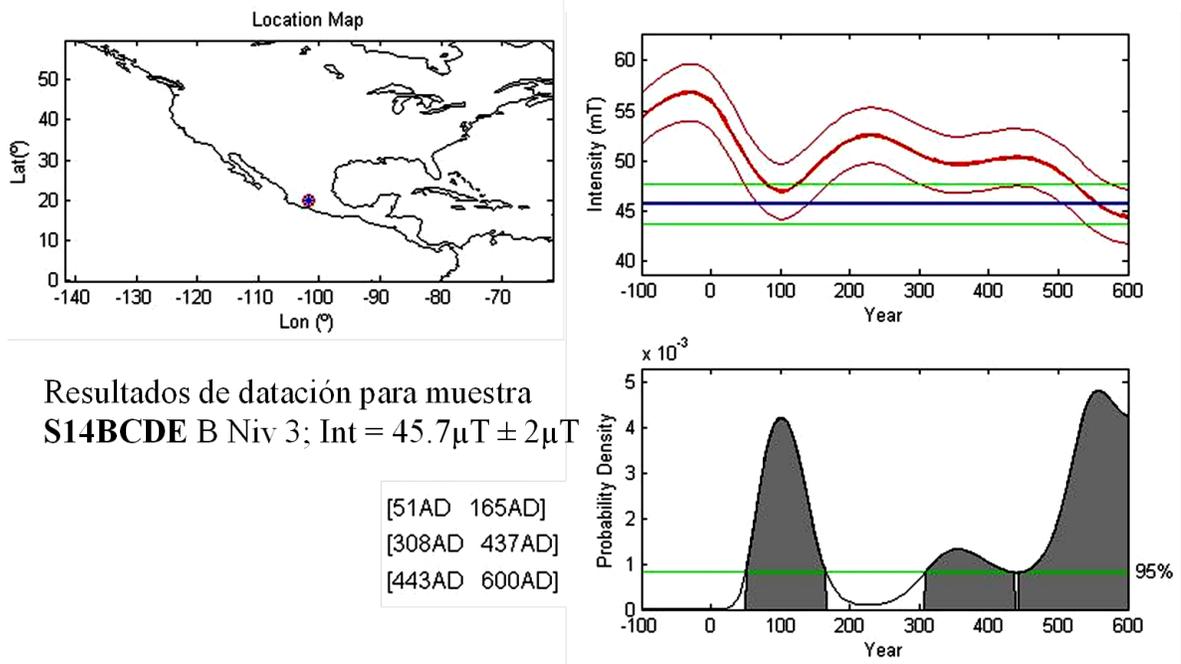


Figura 6.9. Ejemplo de datación arqueomagnética usando el modelo global SHAdif14K (Pavón Carrasco et al., 2011 y 2014) para tiesto de Zacapu S14BCDE B Niv 3.

Con la constricción resultante de las dataciones de carbono 14 con las que se cuenta para este sitio, y la comparación con el modelo SHADIF.14k, es posible aportar la información que aparece en las tablas 6.6, 6.7 y 6.8, así como los resultados de asignar temporalidad a la arqueointensidad obtenida. En la figura 6.9, se muestra un ejemplo de la aplicación del programa Pavón-Carrasco *et al*, 2011.

Tabla 6.6. Resultado de la comparación de los resultados experimentales con el modelo SHADIF.14k, considerando el intervalo de tiempo obtenido de carbono 14, para la serie 1 de Zacapu.

Tiestos de Loma Alta, Zacapu, Michoacán Serie 1 (CEMCA, Mich 66). Periodo obtenido de carbono 14: [100 a.C. a 600 d.C.]				Datación por Arqueointensidad Usando Pavón- Carrasco et al 2011
Clasificación Arqueológica	Por Pieza	Arqueointensidad Corregida (CR) [μ T]		Modelo Global SHA.DIF.14k
S14 BCDE Niv1	A	63.0	$\sigma = 6.1$	[100 a.C. - 31 d.C.] [225 d.C. - 232 d.C.]
	B	Sin Resultado		
S14 BCDE Niv2	A	Sin Resultado		
	B	Sin Resultado		
S14 BCDE Niv3	A	34.3	$\sigma = 2.8$	[565 d.C.-600d.C.]
	B	45.7	$\sigma = 4.0$	[51 d.C.-165 d.C.] [308 d.C.-437 d.C.] [443 d.C.-600 d.C.]
S14 BCDE Niv4	A	50.8	$\sigma = 1.6$	[38 d.C.-55 d.C.] [156 d.C.-194 d.C.] [264 d.C.-344 d.C.] [371 d.C.-482 d.C.]
	B	58.2	$\sigma = 1.9$	[86 a.C.-11 d.C.]

Tabla 6.7. Resultado de la comparación de los resultados experimentales con el modelo SHADIF.14k, considerando el intervalo de tiempo obtenido de carbono 14, para la serie 2 de Zacapu.

Tiestos de Loma Alta, Zacapu, Michoacán Serie 2 (CEMCA, Mich 66) (periodo obtenido de carbono 14: [100 a.C. a 600 d.C.])				Datación por Arqueointensidad Usando Pavón- Carrasco 2011
Clasificación Arqueológica	Por Pieza	Arqueointensidad Corregida (CR) [μ T]		Modelo Global SHA.DIF.14k
S14 BCDE Niv5	A	44.0	$\sigma = 1.6$	[80 d.C.- 124 d.C] [525 d.C.-600 d.C]
S14 BCDE Niv6	A	43.0	$\sigma = 2.1$	[85 d.C.-118 d.C] [529 d.C.-600 d.C]
S14 BCDE Niv7	A	48.5	$\sigma = 1.3$	[54 d.C.-95 d.C] [107 d.C.-160 d.C] [324 d.C.-397 d.C] [472 d.C.-533 d.C]
S14 BCDE Niv8	C	61.1	$\sigma = 2.5$	[73a.C.-5d.C.]
S14BCDE Niv10	B	64.6	$\sigma = 1.4$	[58a.C.-5a.C.]
S14BCDE Niv11	A	60.7	$\sigma = 1.5$	[66a.C-2d.C.]
S14BCDE Niv12	A	36.6	$\sigma = 3.3$	[556d.C.-600d.C.]
S14BCDE Niv13	B	44.6	$\sigma = 2.5$	[60d.C.-150d.C.] [493d.C.-600d.C.]

Tabla 6.8. Resultado de la comparación de los resultados experimentales con el modelo SHADIF.14k, considerando el intervalo de tiempo obtenido de carbono 14, para la serie 3 de Zacapu.

Tiestos de Loma Alta, Zacapu, Michoacán Serie 3 (CEMCA, Mich 66) (periodo obtenido de carbono 14: [100 a.C. a 600 d.C.])				Datación por Arqueointensidad Usando Pavón- Carrasco
Clasificación Arqueológica	Por Pieza	Arqueointensidad Corregida (CR) [μ T]		Modelo Global SHA.DIF.14k
S14E Niv14	B	44.2	$\sigma = 2.6$	[65 a.C.- 143 d.C] [505 d.C.-600 d.C.]
S2 CD-AB Niv2	B	56.2	$\sigma = 5.5$	[100 a.C.-55 d.C.] [157 d.C.-341 d.C.] [374 d.C.-479 d.C.]
S2 AB Niv1	A	36.0	$\sigma = 1.8$	[573 d.C.-600 d.C.]
S2 CD Niv1	A	36.6	$\sigma = 2.4$	[565 d.C.-600 d.C]

En las tablas 6.6, 6.7 y 6.8 se muestran en rojo los intervalos con la mayor densidad de probabilidad según el programa de datación usado (Pavón-Carrasco *et al*, 2011) y

empleando el modelo SHADIF.14k, solo están resaltados cuando el programa arroja más de un intervalo.

7. Guachimontones de Teuchitlán

7.1 Arqueología y contexto de la muestras

Las regiones del oeste de Jalisco son ecosistemas naturales muy ricos. Abundan los suelos excelentes y el perfil de recursos codiciados es superior al de la mayoría de las otras áreas de civilización temprana en Mesoamérica. Obsidias de alta calidad, piedras verdi-azules, varios tipos de cristales y la sal se cuentan entre los minerales que se obtenían fácilmente en esta región. La combinación de perfiles de alta calidad para recursos tanto escasos como estratégicos ofreció un excelente trasfondo para el desarrollo de sociedades complejas (Weigand, 1985).

La tradición Teuchitlán representa el primer experimento que se conoce de un estilo de vida civilizado en el Occidente de Mesoamérica que pudo haber comenzado aproximadamente en el 1000 a.C. Un siglo antes de la era cristiana se alcanzó un alto nivel de complejidad en la organización social, caracterizado durante esta fase inicial por las tumbas de tiro de estilo El Opeño (Galván, 1991).

Como se ha planteado ampliamente a lo largo de este capítulo, contrariamente a las afirmaciones dogmáticas acerca de las características de la vida indígena en el Occidente prehispánico, la complejidad social y cultural en esta región se desarrolló a la par con el resto de Mesoamérica. La civilización misma no fue tardía en el Occidente ni tampoco vino de la cuenca central de México.

La investigación sistemática de esta vasta región empezó tardíamente, pero para finales del siglo XX estaba surgiendo un nuevo entendimiento de la riqueza arqueológica y cultural del Occidente de México y parte de ello fue la tradición Teuchitlán.

El núcleo de la tradición Teuchitlán estuvo en el distrito lacustre de las tierras altas y sus valles adyacentes alrededor del volcán de Tequila, ubicado en el centro-oeste de Jalisco. Estos valles ofrecían muy buenas oportunidades para la explotación de recursos acuáticos. Los numerosos afloramientos de obsidiana ofrecían abundantes oportunidades tanto para la

especialización como para el comercio regional y a larga distancia. La riqueza de obsidiana hace del eje volcánico Tequila-Coli el cuarto yacimiento más grande de este mineral a nivel mundial.

El sello distintivo de esta tradición fue un estilo arquitectónico único el cual fue exportado hasta lugares distantes en los siguientes siglos. Este estilo arquitectónico, que fue complejo y de carácter formal, consiste en edificios en forma de círculos concéntricos que frecuentemente alcanzan dimensiones monumentales. Se han localizado cientos de estos edificios en el Occidente mesoamericano y el estilo en sí representa una contribución única a la arquitectura mundial (Weigand, 1996, et al 2008).

El simbolismo cultural de los ciclos arquitectónicos debe de haber sido algo distinto de cualquier cosa en el mundo mesoamericano del periodo Clásico. No hay duda de que esta arquitectura es formal, pues los edificios circulares en general son difíciles de diseñar y de construir, pero dentro del Occidente de México hay varios cientos de ellos. Pueden haber servido como los puntos focales para el culto a una deidad. De esta manera nuestra definición de monumentalidad debe modificarse, es decir, no cómo una simple medida de volumen sino también de complejidad. Los círculos concéntricos ciertamente fueron algo complejo desde la perspectiva de su diseño, y algunos de ellos están contruidos con piedra y cemento de caliche y arcillas finas.

Estas estructuras de mampostería lograron alcanzar grados muy inclinados de construcción, por ejemplo los “Guachimontones” de Teuchitlán (Figura 6.3). Si se consideran desde la perspectiva del complejo diseño y construcción de mampostería, los aproximadamente 80,000 m³ de relleno de estos edificios resultan más impresionantes (Weigand, 1996).

Las grandes tumbas de tiro han aparecido casi en su totalidad dentro de esta área nuclear y una de ellas (conocida como la tumba de Huitzilapa) albergaba una de las colecciones de ofrendas más ricas en toda Mesoamérica.

Otro elemento que representa actividades monumentales de construcción y excelentes conocimientos de ingeniería fueron los vastos campos de chinampas, que se extendían por miles de hectáreas dentro del área lacustre alrededor del volcán de Tequila. Este nivel de

intensificación agrícola sugiere dos hechos sociales importantes: altas densidades poblacionales y un elevado grado de organización social necesarios para llevar a cabo tal nivel de hazañas.

La actividad constructiva a escala monumental empezó en la región durante el periodo Formativo tardío (alrededor del inicio de nuestra era) y llegó a su punto de mayor complejidad en 150 d.C., después de lo cual sólo tuvo cambios superficiales. Dentro del área nuclear del volcán de Tequila se han excavado cinco recintos. Guachimontones es uno de estos recintos excavados entre 1999 y 2005. Posee la colección más abundante de edificios circulares y de juegos de pelota colosales de todo el Occidente mesoamericano. Uno de los juegos de pelota fue el más grande de todo Mesoamérica, hasta que fue superado 1000 años después por el de Chichén Itzá.

Las excavaciones en el recinto de los Guachimontones de Teuchitlán ofrecen las primeras perspectivas respecto a la vida ceremonial de la tradición Teuchitlán vista desde un complejo monumental. De esta manera se complementa y contextualiza el material encontrado en las excavaciones de recintos más pequeños en la misma área como las Bugambilias, Cerro de Tepopote, Navajas, Llano Grande, Huitzilapa, así como cientos de estructuras circulares localizadas en la prospección que no se han excavado.

Desde el punto de vista de los Guachimontones se representa una perspectiva de la cima del sistema sociocultural, que permite estudiar los elementos superiores de la elite que aparentemente controlaron y administraron el sistema general. El “Estado” del Occidente era segmentario y utilizaba el prestigio del ceremonialismo, más que la fuerza directa, para cimentar el sistema social y para expandirse hacia las regiones vecinas. Este sistema fue dinámico durante los primeros 500 años de nuestra era y abarcaba desde el Norte de Jalisco y Sur de Zacatecas. Fuera de la zona nuclear, la presencia arquitectónica parece seguir las rutas de comercio o de intercambio. Sin embargo el núcleo de esta tradición –donde se concentra toda la arquitectura monumental- es más bien pequeño y consiste en los valles que circundan el volcán de Tequila y su perímetro está marcado y protegido por una serie de sitios preservados, algunos con impresionantes muros de contención (Weigand *et al*, 2008).

De este sitio se investigaron 2 tipos de material: el primero, un material novedoso para este tipo de investigaciones, denominado Bajareque, este material es el resultado de un método de construcción, en el cual se levantaba una empalizada doble se rellena de arcilla y se le prende fuego a la empalizada, llegando a temperaturas de al menos 600°C (Terán et al 2016). El otro material fueron tiestos el cual es un material clásico para la investigación de arqueointensidad.

7.2 Los Bajareques

Este material proporcionado por los arqueólogos encargados del lugar, fue obtenido de las estructuras que a continuación se describen:

La Joyita. — Al parecer corresponde a las primeras unidades de vivienda del sitio Guachimontones, se encuentra en un vado al Sur y al oeste del centro ceremonial. Contiene varias plataformas residenciales, hornos de cerámica y varios enterramientos. Este bajareque viene de la zona cerca del horno en una capa roja de 30 a 40 cm de profundidad.

La Joya 7. Corresponde a una de las plataformas de la plaza principal. Este sitio consiste en una plataforma escalonada, donde fue posible observar los muros de piedra y los cimientos de algunas de las habitaciones. Según dataciones de carbono 14 es el primer complejo habitacional de la zona arqueológica. La muestra proviene de una capa de 30 a 40 cm de profundidad

Círculo 6. Este círculo está situado al oeste del cuerpo principal de Guachimontones. Durante las excavaciones de 2003 fueron encontradas 3 tumbas de tiro en el altar principal y dos entierros con una gran variedad de ofrendas. Aunque es el círculo pequeño, de 50 m de diámetro, fue el que produjo la mayoría de las sorpresas y los elementos más ricos. El bajareque proviene de la zona cerca del entierro 5, en una capa de 40 cm de color rojo oscuro.

Círculo 4. Este círculo está situado al oeste del juego de pelota principal de Guachimontones. Este círculo está formado por ocho plataformas, sobre las cuales se yergue

un altar cuadrado de baja altura. La muestra proviene de los muros de piedra de la plataforma 4, dentro de una capa roja a 25 cm de profundidad. .

Círculo 1. Este círculo también conocido como el “Gran Guachi”, es el más grande círculo ceremonial con un diámetro de 120 metros, el altar ceremonial se yergue sobre 12 plataformas, alcanzando los 14 metros de altura. La muestra “A”, proviene de una capa roja a 40 cm de profundidad del altar principal.

La plataforma 2 del círculo 1, de donde proviene la muestra, es un relleno a gran escala donde hay grandes cantidades de barro quemado, algunos incluso vitrificados.

Loma Alta (círculo A). — Este complejo ceremonial está a 500 metros de Guachimontones. Las muestras se recogieron en la primera temporada de campo en 2004 en el círculo principal conocido como círculo de A (alrededor de 80 m de diámetro mientras que el altar

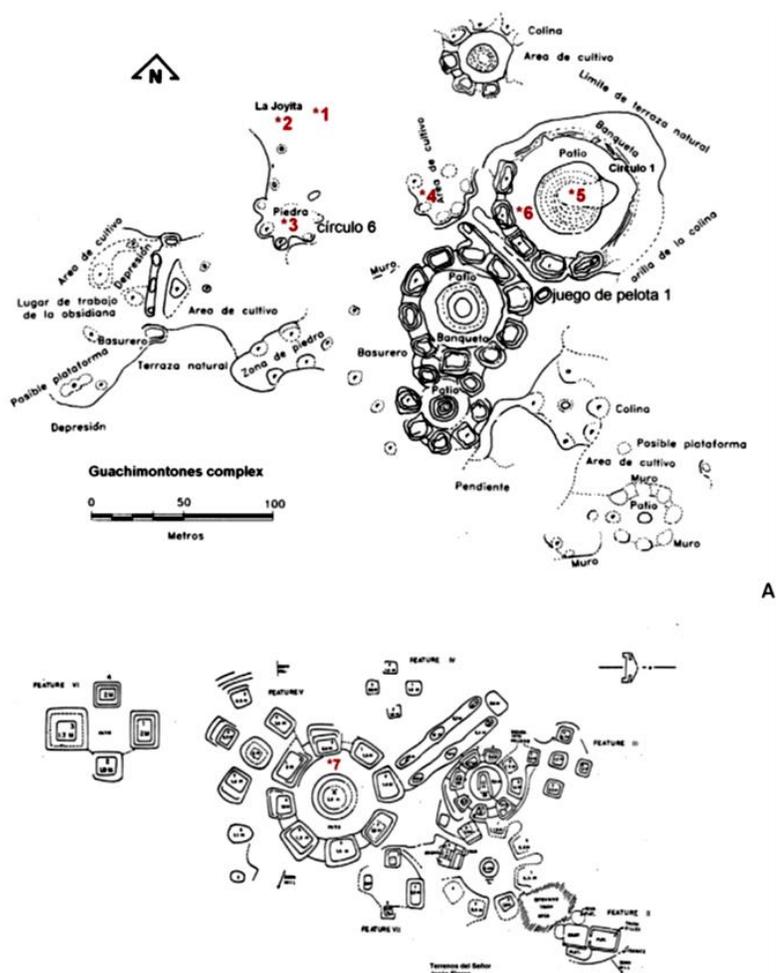


Figura 7.1. Localización de las muestras 1. La Joyita 2. La Joya 3. Círculo 6 4. Círculo 4, plataforma 4 5. Círculo 1, altar 6. Círculo 1, plataforma 2 7. Círculo A, altar.
Tomado de Terán et. al. 2015.

principal tiene 8 m de altura). Los fragmentos de Bajareque son colectados en unos 20 cm de profundidad del suelo.

7.3 Dataciones por carbono 14

Las dataciones disponibles para este material, tomadas de Tradición Teuchitlán, Weigand et. al. 2008, están relacionadas directamente con cada muestra de bajareque como sigue:

Tabla 7.1. Dataciones por carbono catorce disponibles para los bajareques investigados

Muestra	Datación por carbono 14	Fecha Calibrada con CalPal
La Joya 7	Beta 192096; 2250 ± 50 BP	[234 d.C.-372 d.C.]
La Joyita	Beta 192096; 2250 ± 50 BP	[234 d.C.-372 d.C.]
Circulo 1 Capa roja A	Beta 192092; 1870 ± 40 BP	[89 d.C.-197 d.C.]
Circulo 1 Plataforma 2	Beta 192093; 1710 ± 50 BP	[262 d.C.-380 d.C.]
Circulo 4 Plataforma 4	Beta 192094; 1870 ± 50 BP	[82 d.C.-202 d.C.]
Circulo 6 Estación 5	Beta 192086; 2080 ± 40 BP	[56 d.C.-160 d.C.]

7.4 Propiedades magnéticas de los Bajareques

Haciendo uso de la “Advanced Variable Field Translation Balance (AVFTB)”, se llevaron a cabo 4 experimentos de caracterización magnética, los cuales son: magnetización isothermal remanente, o IRM por sus siglas en inglés”, ciclos de histéresis, campo reverso, y curvas termomagnéticas de alta temperatura. Con el fin de determinar la información de contenido y características magnéticas de los bajareques. Como se puede observar en la curva termomagnética de las muestras estudiadas figura 7.2 a) se exhibe un comportamiento de reversibilidad considerablemente bueno, el incremento de la susceptibilidad magnética hasta un comportamiento de pico de Hopkinson, alrededor de los

570°C evidencia que se tiene magnetita casi pura como la portadora principal de la magnetización remanente (Petrovský & Kapička, 2006). El ciclo de histéresis figura asociado 7.2 b), muestra una mezcla de fases ferrimagnéticas y antiferromagnéticas, la misma muestra no saturó al aplicar el campo magnético máximo del equipo en el experimento IRM figura 7.2 c). Por otro lado se aprecia un decrecimiento monótonico en la curva termomagnética, figura 7.2 d) lo cual es evidencia de la co-existencia de hematita, hipótesis que toma fuerza si se considera que la muestra no saturó al máximo campo posible aplicado en laboratorio en el experimento IRM, figura 7.2 f), en esta muestra es posible apreciar un comportamiento de dominio simple en el experimento de ciclo de histéresis figura 7.2 e), considerando lo cocientes del ciclo de histéresis (Day et al. 1977). La existencia de magnetita y el estado de dominio evidenciado en las muestras trabajadas exponen un comportamiento ideal para el experimento de determinación de arqueointensidad tipo Thellier.

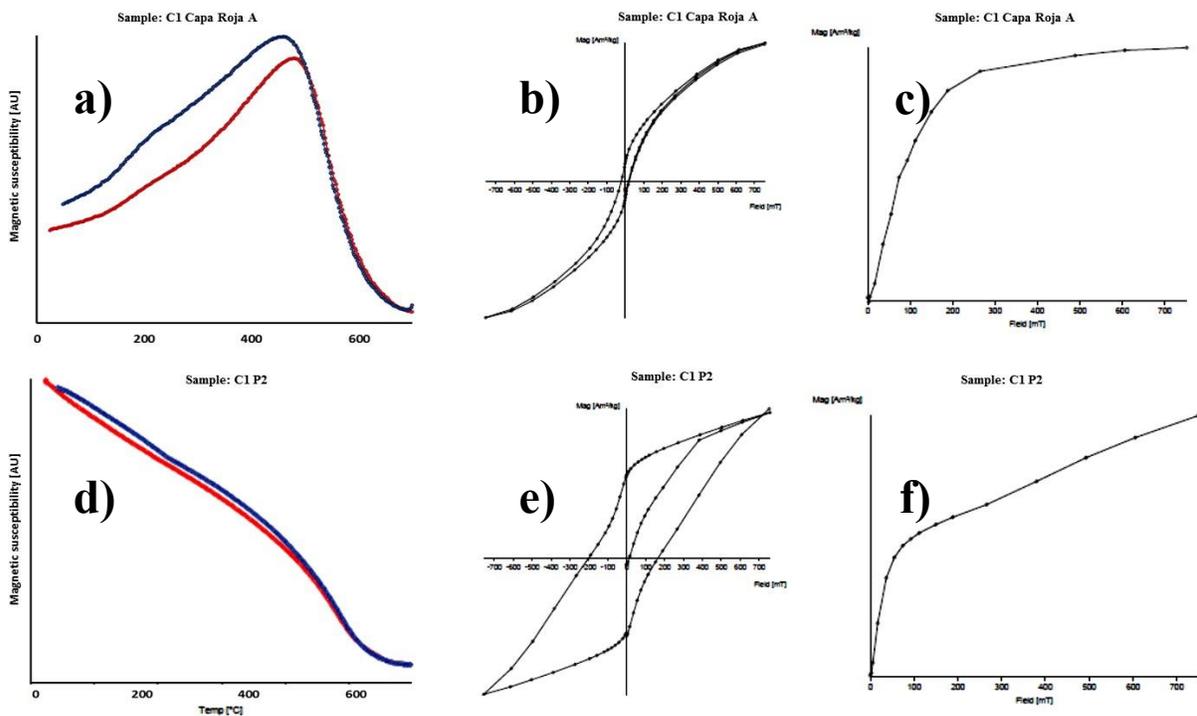


Figura 7.2 Graficas de los comportamientos característicos de magnetismo de las rocas de los bajareques estudiados.

7.5 Las muestras y su preparación

Ocho muestras de bajareque fueron procesadas, las cuales provienen de contextos arqueológicos bien controlados y descritos previamente, con datación de carbono catorce asociado y caracterizadas por sus propiedades magnéticas, de cada una de las muestras se hicieron cortes para obtener seis especímenes, cada una las cuales fueron orientadas en un sistema cartesiano arbitrario de referencia ($\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$) para su control en laboratorio y para promediar los valores de las pastillas hermanas con el fin de corregir o al menos disminuir la anisotropía de termorremanencia (Morales 2012, 2013, 2015), por lo tanto se obtuvieron 48 especímenes.

Los especímenes se logran embebiendo en sal pulverizada, cortes del bajareque de 1cm cubico aproximadamente y comprimiendo con ayuda de una prensa de 20 toneladas en un cilindro de metal no magnético diseñado específicamente para este fin, así quedan conformados cilindros de sal de 2.54cm de diámetro y 2cm de alto, lo cual es un requerimiento del magnetómetro AGICO JR6 con el que se realizaron todas las mediciones de magnetización remanente.

Tabla 7.2. Relación de los Bajareques investigados en este trabajo.

Bajareques de Guachimontones	
Información Arqueológica	
Loma Alta	
La Joya 7	

La Joyita	
Circulo 1 Capa roja Pieza A	
Circulo 1 Capa roja Pieza B	
Circulo 1 Plataforma 2	
Circulo 4 Plataforma 4	
Circulo 6 Estación 5	

7.6 Determinación de arqueointensidades

La determinación de intensidades fue realizada utilizando el método de Thellier y Thellier, (1959), modificado por Coe, (1967). Los calentamientos y enfriamiento fueron hechos en un horno ASC TD48 y el campo de laboratorio aplicado fue de 45 μ T. Se aplicaron 14 pasos de incremento de temperatura los cuales fueron distribuidos entre los 100°C y 580 °C. Con calentamientos sin campo conocidos como ‘pTRM checks’ realizados cada tercer paso de doble calentamiento a todo lo largo del proceso. Se llevaron a cabo dos pasos sin campo a 350°C y 475°C denominados tail check’s, con el fin de evaluar un posible estado de multidominio magnético (Riisager & Riisager, 2001). Con el objetivo de cuantificar la diferencia entre enfriar con ayuda de un ventilador –como se hace actualmente en laboratorio- y enfriar sin ayuda de uno, como se hizo al momento de la quema del

bajareque, se realizó un experimento al final de la determinación de arqueointensidades, denominado “cooling rate (CR)” sugerido en Chauvin et al 2000, y adaptado e implementado por Morales et al. 2007, 2009, 2011, 2012, 2013, 2015. El cual consta de tres calentamientos más, con campo aplicado (en este caso 45 μ T), a la temperatura más alta alcanzada en el experimento de determinación de intensidades (580°C), en el primero denominado TRM_{R1}, las muestras se enfrían con ayuda de un ventilador, en el segundo denominado TRM_L, las muestras se enfrían sin ayuda de un ventilador en un tiempo aproximado de 6 horas, finalmente en un paso denominado TRM_{R2}, se calientan nuevamente y se enfrían con ayuda de un ventilador, con los valores de magnetización obtenidos en los tres pasos antes descritos se calculan 2 coeficientes, el primero para evaluar un posible cambio termoquímico denominado factor de transformación $f_{tr} = \frac{TRM_{R2}}{TRM_{R1}}$, si y solo si, el factor de transformación no excedió el 15% de variación, entonces se aplica la corrección utilizando el factor de corrección, $f_{cr} = \frac{TRM_{R1}}{TRM_L}$, y este factor solo se aplica cuando la corrección no excede 15%, pues de lo contrario se podría pensar en un comportamiento artificioso y no natural.

Los resultados obtenidos en la determinación de arqueointensidad se sometieron a discriminación, según los siguientes criterios de aceptación:

- 1) aquellos especímenes en cuyo diagrama de Arai (Nagata, 1963) es posible apreciar un comportamiento lineal, i.e., que no presentara concavidad hacia arriba, lo cual es evidencia de un posible multidominio (Levi, 1977), en un segmento que contenga al menos 9 puntos para su evaluación cuantitativa;
- 2) que la fracción de la NRM fuese superior a 70%, i.e., f (Coe, 1978) ≥ 0.7 ;
- 3) que el parámetro de confianza q (Coe, 1978) tuviese un valor de al menos 5;
- 4) que los diagramas de Zijdeveld (Zijdeveld, 1967) fuesen colineales al origen;
- 5) que los pTRM checks no tuviesen una desviación superior al 10%. Aquellos resultados que cumplieron con los criterios antes descritos fueron aceptados.

La figuras 7.3 a), b), c) y d) muestran los diagramas de Arai (Nagata, 1963) y Zijdeveld (1967) representativos de los especímenes que se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta con los criterios antes descritos.

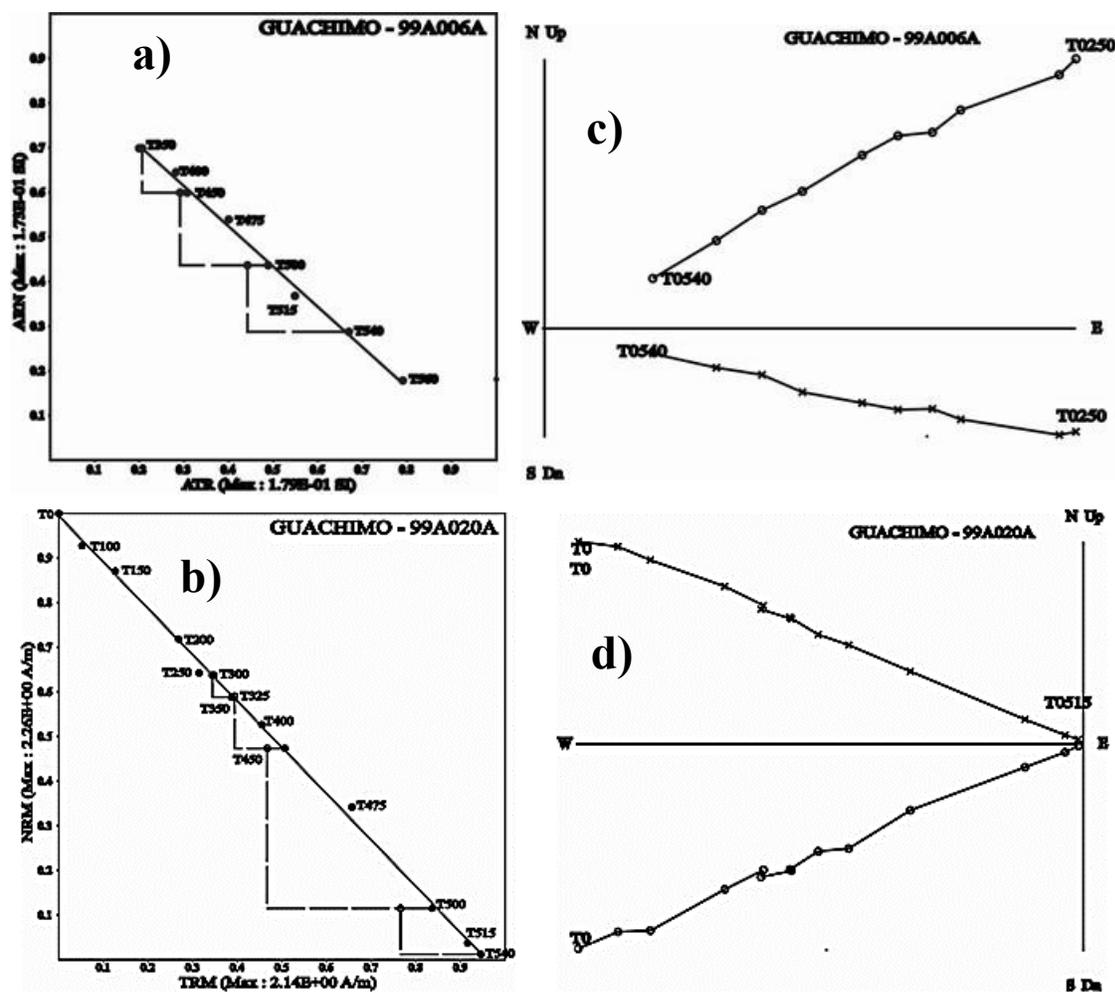


Figura 7.3 a), b) Diagramas de Arai (Nagata, 1963) c), d) Diagrama de Zijdeveld (1967) representativos de los especímenes de bajareques que se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

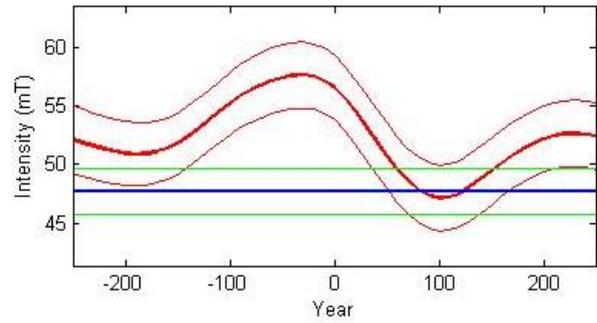
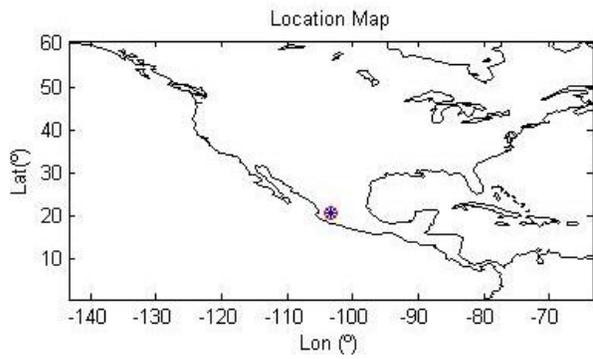
Aplicando los criterios de discriminación antes descritos se calcularon las intensidades de los especímenes y se promediaron para obtener la intensidad del tiesto. En la tabla que se muestra enseguida se exhiben los resultados de los cálculos de arqueointensidad.

Tabla 7.3 Resultados de arqueointensidades, T_1-T_2 : intervalo de temperatura usado para los cálculos, f : fracción de NRM usada en la determinación, g : factor de espaciamiento, q : factor de calidad; tomados de Coe (1978), n : número de pasos que intervienen en los cálculos, H_{cruda} : arqueointensidad no corregida, H_{corr} : arqueointensidad corregida con el ritmo de enfriamiento. **SR**: Sin Resultado

Muestra	Espécimen	T_1-T_2 [°C]	H_{cruda} [μT]	f	g	q	n	Prom. [μT]	Desv. Est. [μT]	H_{corr} [μT]	Prom. [μT]	Desv. Est. [μT]
Loma Alta	99A001A	[200.560]	49.72	0.846	0.835	9.1	11	48.3	4.01	46.95	46.7	3.9
	99A002A	[200.560]	49.03	0.959	0.870	11.9	11			49.01		
	99A003A	[200.150]	41.98	0.701	0.878	16.7	10			41.02		
	99A004A	[200.560]	49.33	0.880	0.894	12.8	12			47.78		
	99A005A	[300.580]	53.88	0.759	0.829	5.7	9			51.82		
	99A006A	[250.560]	45.92	0.727	0.862	10.1	9			43.54		
La Joya 7	99A007A	[200.560]	58.07	0.673	0.854	13.3	10	55.1	1.84	54.78	51.5	2.1
	99A008A	[150.580]	56.21	0.909	0.895	29.6	13			53.04		
	99A009A	[150.560]	54.20	0.722	0.886	11.8	12			50.16		
	99A010A	[150.580]	55.26	0.915	0.828	38.0	12			51.37		
	99A011A	[150.560]	52.99	0.727	0.888	26.4	12			50.10		
	99A012A	[150.560]	53.84	0.709	0.891	13.8	12			49.40		
La Joyita	99A013A	[200.560]	44.21	0.494	0.858	12.1	11	51.4	3.54	39.63	45.4	3.6
	99A014A	[200.560]	52.09	0.475	0.860	10.8	11			47.37		
	99A015A	[200.580]	52.96	0.617	0.843	15.6	12			47.71		
	99A016A	[200.580]	52.84	0.594	0.854	14.4	12			44.39		
	99A017A	[200.580]	53.22	0.546	0.869	13.3	12			43.54		
	99A018A	[200.560]	53.06	0.615	0.826	8.3	11			49.50		
Circulo 1	99A019A	[0.540]	46.97	0.992	0.837	59.2	13	46.6	1.98	46.22	45.7	1.9

Capa Roja	99A020A	[0.540]	46.67	0.990	0.876	76.1	13			46.04		
A	99A021A	[0.540]	49.88	0.909	0.849	52.1	13			48.86		
	99A022A	[0.540]	46.99	1.004	0.881	42.0	13			45.89		
	99A023A	[0.540]	44.25	0.976	0.877	77.0	13			43.82		
	99A024A	[0.540]	44.88	0.980	0.887	32.4	13			43.62		
Circulo 1	99A025A	S/R										
Capa Roja	99A026A	S/R										
B	99A027A	S/R										
	99A028A	S/R										
	99A029A	S/R										
	99A030A	S/R										
Circulo 1	99A031A	[200.560]	41.89	0.793	0.885	27.7	12	43.4	4.68	38.50	38.7	4.5
Plataforma 2	99A032A	[200.560]	45.07	0.848	0.861	16.2	12			41.23		
	99A033A	[200.560]	40.52	0.807	0.883	16.8	12			33.49		
	99A034A	[200.560]	48.07	0.806	0.869	16.2	12			37.40		
	99A035A	[200.520]	36.40	0.682	0.869	6.6	10			35.44		
	99A036A	[0.540]	48.42	0.942	0.876	43.9	13			46.16		
Circulo 4	99A037A	[150.560]	55.53	0.620	0.853	25.5	11	55.1	2.27	52.58	52.0	2.5
Plataforma 4	99A038A	[150.560]	56.42	0.491	0.849	18.3	12			54.57		
	99A039A	[150.560]	51.48	0.585	0.840	24.1	12			48.39		
	99A040A	[150.560]	57.96	0.590	0.856	27.9	11			54.44		
	99A041A	[150.560]	55.36	0.657	0.839	32.4	13			52.51		
	99A042A	[150.560]	53.56	0.691	0.691	29.5	13			49.71		
Circulo 6	99A043A	[150.580]	41.66	0.713	0.837	22.3	13	44.8	2.78	38.03	38.6	0.8
Estación 5	99A044A	[150.560]	43.46	0.518	0.844	16.6	12			39.03		
	99A045A	[150.560]	43.31	0.489	0.858	12.8	12			38.07		
	99A046A	[150.560]	44.00	0.471	0.851	10.7	12			37.81		
	99A047A	[150.560]	47.43	0.499	0.842	12.7	12			40.06		
	99A048A	[150.580]	48.96	0.658	0.857	34.0	13			38.49		

Haciendo uso del programa desarrollado en Matlab de Pavon-Carrasco 2011, se compararon los valores de las determinaciones absolutas de arqueointensidad con el modelo de intensidad global SHADIF.14k y se obtuvieron intervalos de tiempo para los resultados obtenidos de arqueointensidad, estos intervalos de tiempo fueron constreñidos por las dataciones de carbono 14 con las que se cuenta para este sitio. En la **figura 7.4** un ejemplo de la aplicación del programa Pavón-Carrasco et al 2011. En la **tabla 7.4** se muestran los resultados de asignar temporalidad a la arqueointensidad obtenida.



Resultado de la datación de la muestra de bajareque “Loma Alta”, usando “A Matlab Tool for Archaeomagnetic Dating” Pavón-Carrasco 2011. (Versión 6.0, 2015)

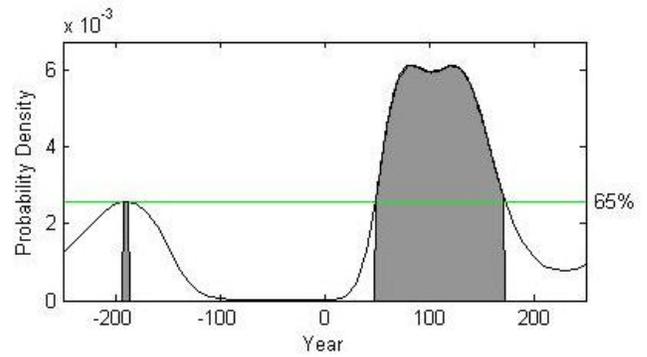


Figura 7.4. Ejemplo de datación arqueomagnética usando el modelo global SHAdif14K (Pavón Carrasco et al., 2011 y 2014) para bajareque de Guachimontones. Loma Alta.

Tabla 7.4. Resultado de la comparación de los resultados experimentales con el modelo SHADIF.14k, considerando el intervalo de tiempo obtenido de carbono 14, para los bajareques de Guachimontones de Teuchitlán.

Arqueointensidades obtenidas de los Bajareques. Guachimontones, Jalisco.			Datación por Arqueointensidad Usando Pavón-Carrasco 2011
Clasificación Arqueológica	Arqueointensidad Corregida (CR) [μT]		Modelo Global SHA.DIF.14k
Loma Alta	46.7	3.9	[49 d.C.- 173 d.C]
La Joya 7	51.5	2.1	[232 d.C.- 306 d.C]
La Joyita	45.4	3.6	[326 d.C.- 360 d.C]
Circulo 1 Capa roja A	45.7	1.9	[90 d.C.- 118 d.C]
Circulo 1 Capa roja A	SR	SR	SR
Circulo 1 Plataforma 2	38.7	4.5	[333 d.C.- 370 d.C]
Circulo 4 Plataforma 4	52.0	2.5	[167 d.C.- 200 d.C]
Circulo 6 Estación 5	38.6	0.8	[93 d.C.- 109 d.C]

7.7 Los tiestos

Los tiestos con los que se trabajó es este caso son 15 tiestos provenientes de la estructura denominada “*círculo 6*”, y fueron proporcionados por los arqueólogos en el marco del “Proyecto Teuchitlán”. De cada tiesto se obtuvieron 6 especímenes que corresponden (en un sistema ortogonal de referencia arbitrario) a las tres direcciones cartesianas con sus respectivos sentidos, con la finalidad de corregir o disminuir el efecto de una posible anisotropía de termorremanencia (Morales et al 2012, 2013, 2015), por lo tanto se obtuvieron 90 especímenes, a los cuales se les dividió en dos series debido a la capacidad del horno ASC TD48, con el que se trabajó. En este caso se procedió a trabajar con todo el material sin previa preselección, pues el tamaño de los tiestos, en la mayoría de los casos, no permitió más de 6 cortes. El experimento de variación continua de la susceptibilidad magnética con la temperatura, se llevó a cabo con el polvo remanente del corte.

Los especímenes se logran embebiendo en sal pulverizada, cortes del tiesto de 1cm cubico aproximadamente y comprimiendo con ayuda de una prensa de 20 toneladas en un cilindro de metal no magnético diseñado específicamente para este fin, así quedan conformados cilindros de sal de 2.54cm de diámetro y 2cm de alto, lo cual es un requerimiento del magnetómetro de giro AGICO JR6 con el que se realizaron todas las mediciones de magnetización remanente.

Tabla 7.5 Relación de los tiestos investigados para este sitio a) Serie 1, b) Serie 2

a)

b)

Tiosos del Proyecto Teuchitlán Serie 1			Tiosos del Proyecto Teuchitlán Serie 2		
Clasificación Arqueológica		Fotografía	Clasificación Arqueológica		Fotografía
Muestra 1	Círculo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm		Muestra 9	Círculo 6, Pozo 6, procedente de recámara 1, 1.70 m, bolsa 303	
Muestra 2	Círculo 6, Pozo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm		Muestra 10	Círculo 6, Pozo 1, cuadro lado sur, capa II, arcilla roja, Material junto a cráneo 3	
Muestra 3	Círculo 6, Pozo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm		Muestra 11	Círculo 6, Pozo 1, cuadro lado sur pozo 1, capa II, arcilla roja, pozo 314 Material junto a cráneo 3	
Muestra 4	Círculo 6, Pozo 2, cala1, capa II, Bolsa 227, 1.60 m		Muestra 12	Círculo 6, Pozo 4, capa II, nivel 100-140 cm, bolsa 275	
Muestra 5	Círculo 6, Pozo 2, cala1, capa II, Bolsa 227, 1.60 m		Muestra 13	Círculo 6, Capa II, pozo 6, bolsa 115 (4), nivel IV, 60-80 cm prof. Interior del muro N	
Muestra 6	Círculo 6, Pozo 4, capa II y III, Bolsa 173, 1 m		Muestra 14	Círculo 6, Cala 1, Pozo 1, bolsa 130. Cerámica junto a cráneo 3	
Muestra 7	Círculo 6, Pozo 4, 90-100 cm, capa II, arcilla roja		Muestra 15	Círculo 6, Cala 1, Pozo 1, bolsa 130. Cerámica junto a cráneo 3	
Muestra 8	Círculo 6 Patio, Pozo 34 16 NW, 60-80 cm, (4655)				

7.8 Dataciones por carbono 14

El carácter funerario/ceremonial de la estructura círculo 6 de donde provienen los tiestos investigados permitió obtener material orgánico para la datación con carbono 14. Tomados de Weigand et al. 2008, se tienen 4 dataciones con códigos Beta 192085, Beta 192086, Beta 192087, Beta 192084, los cuales sitúan a los tiestos en el intervalo **[164 a.C. – 206 d. C.]**.

7.9 Análisis de Magnetismo de Rocas

Haciendo uso de un AGICO MFK1 Kappabridges, en el Laboratorio de Estudios Paleoclimáticos y Paleoambientales de la ENES Morelia, se realizaron curvas continuas de susceptibilidad magnética Vs Temperatura (Goguitchaichvili et al, 2001), con el fin de identificar a los minerales responsables de la magnetización a través de su temperatura de Curie (T_C), de las muestras con las que se trabajó. A continuación se exhiben gráficas que ejemplifican a los especímenes para los cuales fue posible determinar la arqueointensidad absoluta.

En la tabla 7.6 se muestran los resultados de los análisis de rocas y los minerales asociados calculados con el método de la segunda derivada (Tauxe, 1998), dichas temperaturas de bloqueo en las curvas de calentamiento corresponden a titanomagnetitas pobres en titanio.

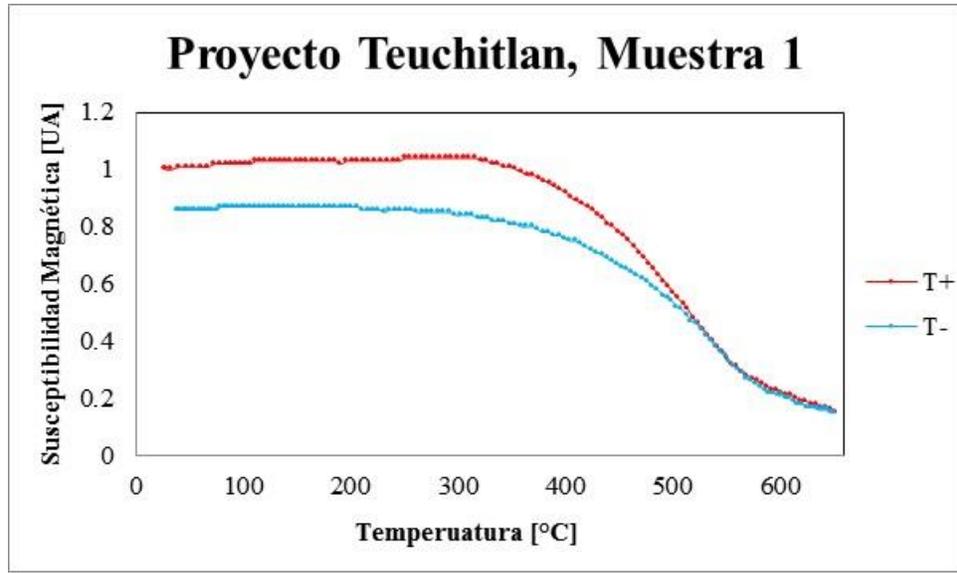


Figura 7.5. Grafica característica del experimento de la medición continua de la variación de la susceptibilidad magnética Vs Temperatura de los tiestos con los que se trabajó.

Tabla 7.6 Temperaturas de Curie disponibles de los tiestos investigados en este trabajo.

Temperaturas de Curie tiestos “Circulo 6”, Proyecto Teuchitlán, Guachimontones Jalisco.			
Serie 1	T_c (°C)	Serie 2	T_c (°C)
Muestra 1	467.6	Muestra 7	528.9
Muestra 2	527.6	Muestra 10	473.9
Muestra 3	499.4	Muestra 14	535.2
Muestra 4	511.2		

Las temperaturas de Curie calculadas con la segunda derivada de las curvas κT (Tauxe, 1998), exhiben contenido de titanomagnetitas pobres en titanio, las curvas de calentamiento

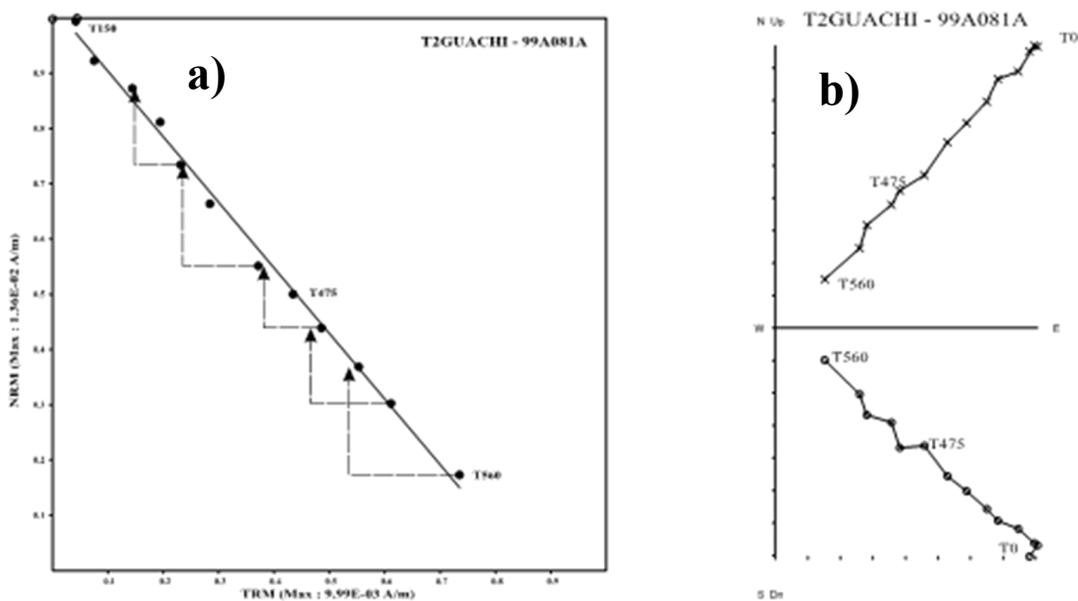
y enfriamiento son razonablemente reversibles, lo que evidencia una alta estabilidad térmica en estas muestras.

7.10 Determinaciones de arqueointensidades.

La determinación de intensidades fue realizada utilizando el método de Thellier y Thellier, (1959), modificado por Coe, (1967). Los calentamientos y enfriamientos fueron hechos en un horno ASC TD48 y las mediciones de magnetizaciones remanentes fueron realizadas con magnetómetro de giro AGICO JR6, el campo de laboratorio aplicado fue de 45 μ T. En dirección +z. Se aplicaron 13 pasos de incremento de temperatura lo cuales fueron distribuidos entre los 100°C y 560 °C. Con calentamientos sin campo conocidos como ‘pTRM checks’ realizados cada tercer paso de doble calentamiento a todo lo largo del proceso. Se llevaron a cabo dos pasos sin campo a 350°C y 475°C denominados tail check’s, con el fin de evaluar un posible estado de multidominio magnético (Riisager y Riisager, 2001). Con el objetivo de cuantificar la diferencia entre enfriar con ayuda de un ventilador –como se hace actualmente en laboratorio- y enfriar sin ayuda de uno, como se hizo al momento de la fabricación de la cerámica, se realizó un experimento al final de la determinación de arqueointensidades, denominado “cooling rate (CR)” propuesto por Chauvin et al. 2000, y acondicionado e implementado por Morales et al, 2007, 2009. 2011, 2012, 2013, 2015, el cual consta de tres calentamientos más, con campo aplicado, a la temperatura más alta alcanzada en el experimento de determinación de intensidades, los cuales son en este caso 45 μ T y 560 °C, en el primero denominado TRM_{R1}, las muestras se enfrían con ayuda de un ventilador, en el segundo denominado TRM_L, las muestras se enfrían sin ayuda de un ventilador en un tiempo aproximado de 6 horas, finalmente en un paso denominado TRM_{R2}, se calientan nuevamente y se enfrían con ayuda de un ventilador, con los valores de magnetización obtenidos en los tres pasos antes descritos se calculan 2 cocientes, el primero para evaluar un posible cambio termoquímico denominado factor de transformación $f_{tr} = \frac{TRM_{R2}}{TRM_{R1}}$, si y solo si, el factor de transformación no excedió el 15% de variación, entonces se aplica la corrección utilizando el factor de corrección, $f_{cr} = \frac{TRM_{R1}}{TRM_L}$, y este factor sólo se aplica cuando la corrección no excede 15%, pues de lo contrario se podría pensar en un comportamiento artificioso y no natural.

Los resultados obtenidos en la determinación de arqueointensidad se sometieron a discriminación, según los siguientes criterios de aceptación:

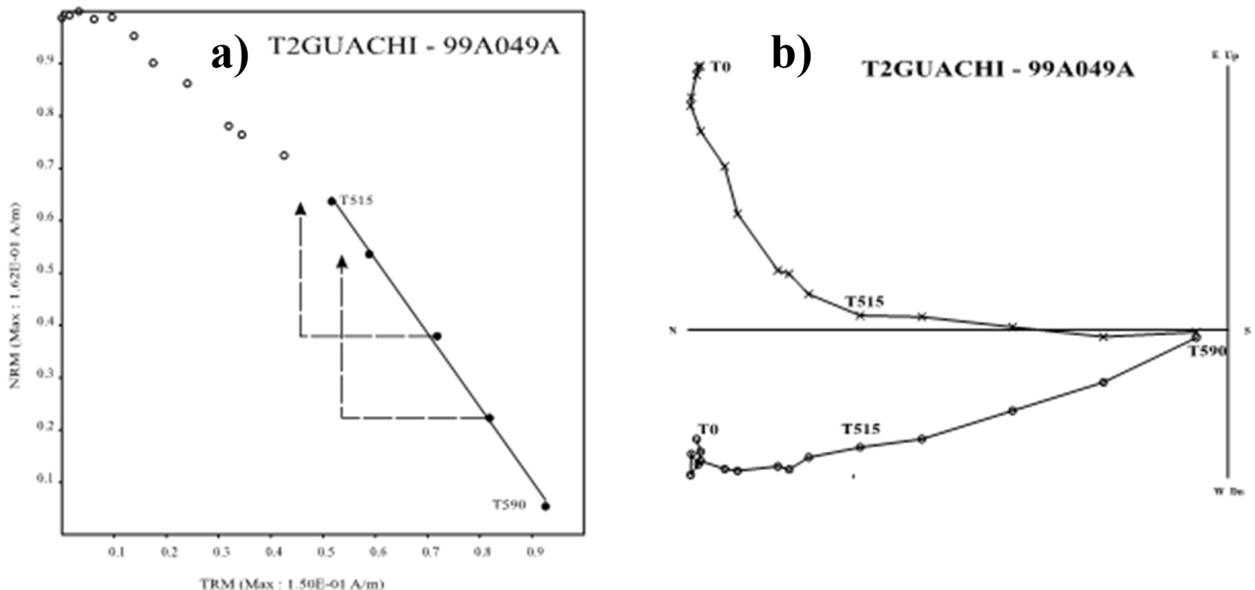
- 1) aquellos especímenes en cuyo diagrama de Arai (Nagata, 1963) es posible apreciar un comportamiento lineal, i.e., que no presentara concavidad hacia arriba, lo cual es evidencia de un posible multidominio (Levi, 1977), en un segmento que contenga al menos 5 puntos para su evaluación cuantitativa,
- 2) que la fracción de la NRM fuese superior a 70%, i.e., $f(\text{Coe}, 1978) \geq 0.7$;
- 3) que el parámetro de confianza q (Coe, 1978) tuviese un valor de al menos 5;
- 4) que los diagramas de Zijdeveld (Zijdeveld, 1967) fuesen colineales al origen;
- 5) que los pTRM checks no tuviesen una desviación superior al 10%. Aquellos resultados que cumplieron con los criterios antes descritos fueron aceptados.



Figuras 7.6 a) Diagramas de Arai (Nagata, 1963) y b) Diagrama de Zijdeveld (1967) representativos de los especímenes que se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

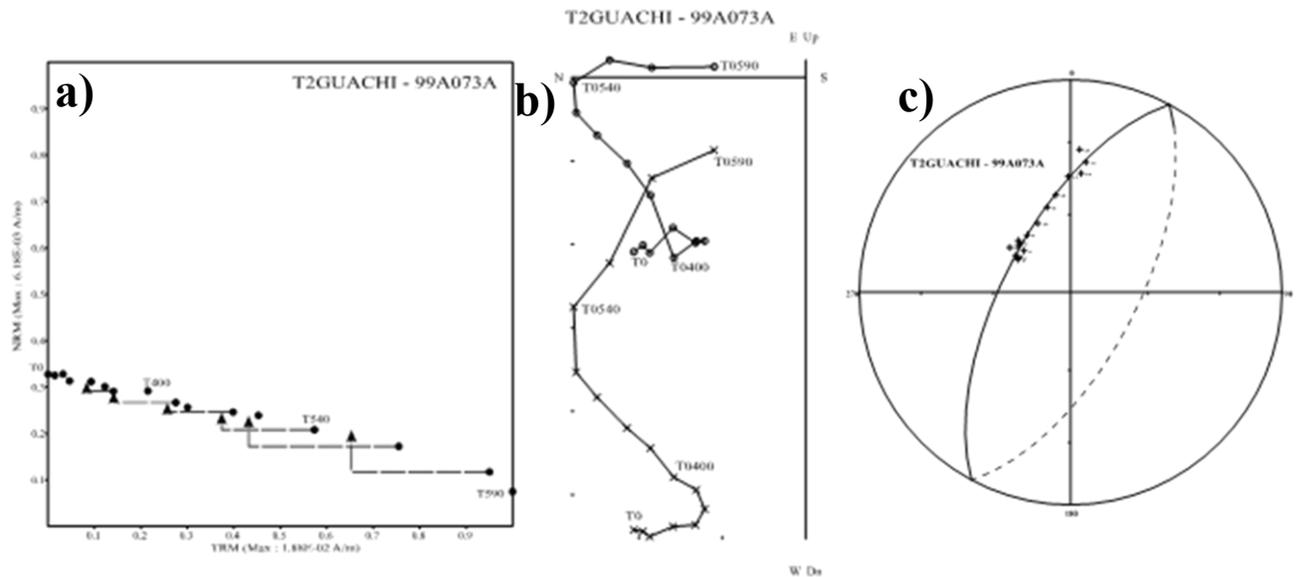
La figura 7.6 a) Diagramas de Arai (Nagata, 1963) y b) Diagramas de Zijdeveld (1967) muestran casos representativos de los especímenes que se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta con los criterios antes descritos.

También se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta los especímenes que presentaban dos componentes del vector de magnetización, sin embargo, se adaptaron los estadísticos de calidad, para tomar a éstos en consideración. En el diagrama de Arai de estos especímenes es posible apreciar un comportamiento lineal en un segmento que contiene al menos 5 puntos. Que el parámetro de confianza q (Coe, 1978) ≥ 3 . En este tipo de especímenes se aceptó que $0.7 \geq f$ (Coe, 1978) ≥ 0.3 , sin embargo la intensidad del campo geomagnético antiguo calculada en estos especímenes es cercano a la del promedio de la muestra, por lo tanto fueron aceptados, además los diagramas de Zijdeveld presentan un segmento final del vector de magnetización colineal al origen. Las figuras 7.7 a) y b) muestran los diagramas de Arai (Nagata, 1963) y Zijdeveld (1967) de los especímenes con las características antes descritas.



Figuras 7.7 a) Diagramas de Arai (Nagata, 1963) y b) Diagrama de Zijdeveld (1967) representativos de los especímenes que se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

Los especímenes no aceptados muestran en los diagramas de Arai un comportamiento no lineal o un posible comportamiento lineal. Los diagramas de Zijderveld de estos especímenes en general no son colineales al origen, y las proyecciones estereográficas no están agrupadas a un punto, sino que de hecho siguen en círculo, lo que sugiere un cambio termoquímico inducido el laboratorio por los calentamientos a los que se someten las muestras. Las figuras 7.8 a), b) y c) exhiben los comportamientos descritos antes.



Figuras 7.8 a) Diagramas de Arai (Nagata, 1963), b) Diagrama de Zijderveld (1967) y c) Proyección estereográfica de los casos representativos de los especímenes que no se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

Aplicando los criterios de discriminación antes descritos se calcularon las intensidades de los especímenes y se promediaron para obtener la intensidad del tiesto. Es las tablas 7.7 y 7.8 se exhiben los resultados de los cálculos.

Tabla 7.7 Resultado de arqueointensidades, T_1-T_2 : intervalo de temperatura usado para los cálculos, f : fracción de NRM usada en la determinación, g : factor de espaciamento, q : factor de calidad; tomados de Coe (1978), n : número de pasos que intervienen en los cálculos, H_{cruda} : arqueointensidad no corregida, H_{corr} : arqueointensidad corregida con el ritmo de enfriamiento. SR: Sin Resultado

Serie 1 de tiestos de Guachimontones. Proyecto Teuchitlán.												
Muestra	Espécimen	T_1-T_2 [°C]	n	H_{cruda} [μT]	f	g	q	Prom. [μT]	Desv. Est [μT]	H_{corr} [μT]	Prom. [μT]	Desv. Est [μT]
Círculo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm	99A001A	[200,560]	11	48.50	0.834	0.891	28.4	46.7	3.8	47.17	45.3	3.6
	99A002A	[200,560]	11	48.36	0.859	0.882	21.5			47.28		
	99A003A	[200,560]	11	50.31	0.842	0.893	19.0			48.43		
	99A004A	[200,560]	11	49.65	0.798	0.895	18.9			47.92		
	99A005A	[200,560]	11	42.06	0.856	0.894	24.2			41.01		
	99A006A	[200,560]	11	41.65	0.838	0.898	14.3			40.33		
Círculo 6, Pozo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm	99A007A	[200,560]	11	40.43	0.771	0.872	45.4	39.0	1.1	40.48	38.9	1.1
	99A008A	[200,560]	11	38.13	0.795	0.870	31.5			38.18		
	99A009A	[200,560]	11	38.19	0.762	0.868	25.1			38.08		
	99A010A	[200,560]	11	38.55	0.793	0.866	25.2			38.44		
	99A011A	[200,560]	11	38.31	0.858	0.861	15.2			38.25		
	99A012A	[200,560]	11	40.48	0.841	0.862	18.2			40.48		
Círculo 6, Pozo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm	99A013A	[400,560]	8	25.93	0.617	0.809	5.9	24.0	4.3	25.71	23.9	1.7
	99A014A	[400,560]	3	17.22	0.284	0.500	0.3			17.11		
	99A015A	[400,560]	8	21.82	0.588	0.792	4.2			21.69		
	99A016A	[400,560]	7	24.84	0.442	0.767	12.1			24.52		
	99A017A	[400,560]	8	24.03	0.644	0.790	5.9			23.83		
	99A018A	[400,560]	8	30.21	0.687	0.820	6.7			29.74		
Círculo 6, Pozo 2, cala I, capa II, Bolsa 227, 1.60 m	99A019A	S/R										
	99A020A	S/R										
	99A021A	S/R										
	99A022A	S/R										
	99A023A	S/R										
	99A024A	S/R										
Círculo 6, Pozo 2, cala I, capa II, Bolsa 227, 1.60 m	99A025A	[400,560]	7	32.56	0.443	0.822	4.4	30.4	2.1	31.88	29.6	2.3
	99A026A	[350,560]	8	28.27	0.541	0.847	8.3			27.53		
	99A027A	S/R										
	99A028A	[400,560]	7	31.95	0.550	0.829	5.7			31.49		
	99A029A	S/R										
	99A030A	[450,560]	6	28.94	0.36	0.774	2.2			27.87		
Círculo 6, Pozo 4, capa II y III, Bolsa 173, 1 m	99A031A	S/R										
	99A032A	S/R										
	99A033A	S/R										

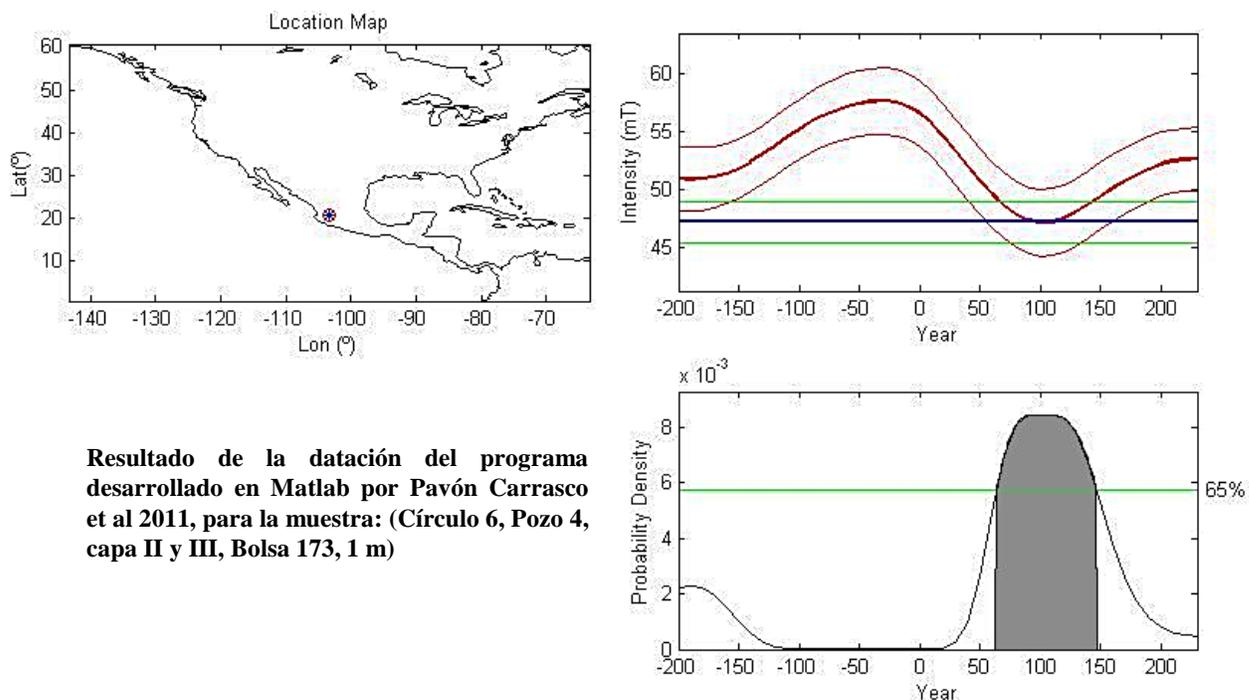
	99A034A	S/R										
	99A035A	S/R										
	99A036A	S/R										
Círculo 6, Pozo 4, 90-100 cm, capa II, arcilla roja	99A037A	[150,560]	12	43.81	0.965	0.897	12.5	39.9	2.8	43.45	39.2	2.9
	99A038A	[150,560]	12	40.30	0.816	0.898	14.1			39.75		
	99A039A	[200,560]	11	37.86	0.792	0.890	10.3			37.23		
	99A040A	[150,560]	11	37.08	0.822	0.889	12.3			36.31		
	99A041A	[150,560]	12	42.79	0.862	0.890	9.7			42.01		
	99A042A	[150,560]	12	37.77	0.856	0.895	8.7			36.85		
Círculo 6 Patio, Pozo 34 16 NW, 60-80 cm, (4655)	99A043A	S/R										
	99A044A	S/R										
	99A045A	S/R										
	99A046A	S/R										
	99A047A	S/R										
	99A048A	S/R										

Tabla 7.8 Resultado de arqueointensidades, T_1-T_2 : intervalo de temperatura usado para los cálculos, f : fracción de NRM usada en la determinación, g : factor de espaciamiento, q : factor de calidad; tomados de Coe (1978), n : número de pasos que intervienen en los cálculos, H_{cruda} : arqueointensidad no corregida, H_{corr} : arqueointensidad corregida con el ritmo de enfriamiento. **S/R**: Sin Resultado

Serie 2 de tiestos de Guachimontones. Proyecto Teuchitlán.												
Muestra	Espécimen	T_1-T_2 [°C]	n	H_{cruda} [μT]	f	g	q	Prom [μT]	Desv. [μT] Est	H_{corr} [μT]	Prom [μT]	Desv. Est [μT]
Círculo 6, Pozo 6, procedente de recámara 1, 1.70 m, bolsa 303	99A049A	[0,500]	5	56.42	0.423	0.742	9.7	47.1	7.0	55.44	47.2	6.6
	99A050A	[0,500]	5	54.20	0.375	0.717	1.2			54.51		
	99A051A	[0,500]	5	47.33	0.400	0.740	1.0			48.05		
	99A052A	[0,500]	5	45.39	0.422	0.719	1.3			44.84		
	99A053A	[0,500]	4	41.07	0.437	0.562	1.3			40.17		
	99A054A	[0,500]	4	38.78	0.448	0.590	1.3			38.14		
Círculo 6, Pozo 1, cuadro lado sur, capa II, arcilla roja, Material junto a cráneo 3	99A055A	[0,200]	10	67.90	0.648	0.873	16.7	59.9	6.8	66.87	59.3	6.3
	99A056A	[400,560]	7	67.46	0.370	0.818	4.0			67.81		
	99A057A	[0,200]	10	60.80	0.607	0.879	23.8			59.79		
	99A058A	[0,250]	9	58.43	0.579	0.866	22.8			57.82		
	99A059A	[0,250]	9	52.38	0.583	0.856	10.7			51.26		
	99A060A	[0,300]	9	52.71	0.543	0.861	17.3			52.61		
Círculo 6, Pozo 1, Cuadro lado sur. pozo 1, capa II, arcilla	99A061A	S/R										
	99A062A	S/R										
	99A063A	S/R										
	99A064A	S/R										

roja, pozo 314 Material junto a cráneo 3	99A065A	S/R										
	99A066A	S/R										
Círculo 6, Pozo 4, capa II, nivel 100-140 cm, bolsa 275	99A067A	S/R										
	99A068A	S/R										
	99A069A	S/R										
	99A070A	S/R										
	99A071A	S/R										
Círculo 6, Capa II, pozo 6, bolsa 115 (4), nivel IV, 60-80 cm prof. Interior del muro N	99A072A	S/R										
	99A073A	S/R										
	99A074A	S/R										
	99A075A	S/R										
	99A076A	S/R										
Círculo 6, Cala 1, Pozo 1, Bolsa 130. Cerámica junto a cráneo 3	99A077A	S/R										
	99A078A	S/R										
	99A079A	[150,560]	12	55.26	0.773	0.900	22.6	48.4	3.9	53.67	47.2	3.6
	99A080A	[150,560]	12	45.90	0.781	0.901	23.0			45.13		
	99A081A	[150,560]	12	47.47	0.804	0.900	32.7			46.78		
	99A082A	[150,560]	12	47.71	0.753	0.900	18.7			46.53		
Círculo 6, Cala 1, Pozo 1, Bolsa 130. Cerámica junto a cráneo 3	99A083A	S/R										
	99A084A	[150,560]	12	45.66	0.751	0.902	26.9			44.38		
	99A085A	[150,560]	12	41.70	0.744	0.904	16.7	45.5	4.2	39.92	44.4	4.0
	99A086A	[150,560]	9	49.23	0.703	0.883	10.7			47.87		
	99A087A	[150,560]	10	43.44	0.638	0.878	10.2			42.81		
	99A088A	[150,560]	12	49.26	0.738	0.900	22.2			47.96		
Círculo 6, Cala 1, Pozo 1, Bolsa 130. Cerámica junto a cráneo 3	99A089A	[150,560]	12	40.17	0.668	0.899	18.6			40.04		
	99A090A	[150,560]	11	49.26	0.691	0.892	14.7			48.24		

Se compararon las arqueointensidades con el modelo SHADIF.14k (Pavón-Carrasco *et al*, 2011), el cual es un modelo global que considera exclusivamente datos arqueomagnéticos y que se puede adaptar, (utilizando un código en el programa Matlab®) a la región geográfica de donde se obtuvieron las muestras arqueológicas. De este modo se obtuvieron intervalos de tiempo para los resultados obtenidos de arqueointensidad, considerando las dataciones de carbono 14 con las que se contaba para este sitio.



Resultado de la datación del programa desarrollado en Matlab por Pavón Carrasco et al 2011, para la muestra: (Círculo 6, Pozo 4, capa II y III, Bolsa 173, 1 m)

Figura 7.9. Ejemplo de datación arqueomagnética usando el modelo global SHAdif14K (Pavón Carrasco et al., 2011 y 2014) para tiesto de Guachimontones. Círculo 6. Pozo 4. Capa II y III

Con la constricción resultante de las dataciones de carbono 14 con las que se cuenta para este sitio, es posible aportar la información que aparece en las tablas 7.9 y 7.10 como los resultados de asignar temporalidad a la arqueointensidad obtenida. En la figura 7.9, se muestra un ejemplo de la aplicación del programa Pavón-Carrasco *et al*, 2011.

Tabla 7.9 Resultados de comparación de arqueointensidades obtenidas con Modelo SHADIF.14k

Arqueointensidades obtenidas de los tiestos del “Proyecto Teuchitlán”. Guachimontones, Jalisco Serie 1			Datación por Arqueointensidad Usando Pavón- Carrasco 2011
Clasificación Arqueológica	Arqueointensidad Corregida (CR) [μT]		Modelo Global SHA.DIF.14k
Círculo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm	45.3	σ = 3.6	[76 d.C.- 130 d.C.]
Círculo 6, Pozo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm	38.9	σ = 1.1	[91 d.C.- 109 d.C.]
Círculo 6, Pozo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm	23.9	σ = 1.7	[96 d.C.- 107 d.C.]
Círculo 6, Pozo 2, cala1, capa II, Bolsa 227, 1.60 m	SR	SR	SR
Círculo 6, Pozo 2, cala1, capa II, Bolsa 227, 1.60 m	29.6	σ = 2.3	[95 d.C.- 108d.C.]
Círculo 6, Pozo 4, capa II y III, Bolsa 173, 1 m	SR	SR	SR
Círculo 6, Pozo 4, 90-100 cm, capa II, arcilla roja	39.2	σ = 2.9	[89 d.C.- 112 d.C.]
Círculo 6 Patio, Pozo 34 16 NW, 60-80 cm, (4655)	SR	SR	SR

Tabla 7.10 Resultados de comparación de arqueointensidades obtenidas con Modelo SHADIF.14k

Arqueointensidades obtenidas de tiestos del Proyecto Teuchitlán. Guachimontones, Jalisco Serie 2			Datación por Arqueointensidad Usando Pavón-Carrasco 2011
Clasificación Arqueológica	Arqueointensidad Corregida (CR) [μ T]		Modelo Global SHA.DIF.14k
Círculo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm	47.2	$\sigma = 6.6$	[197 a.C.-181 a.C.] [49 d.C.-173 d.C.]
Círculo 6, Pozo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm	59.3	$\sigma = 6.3$	[88 a.C.-7 a.C.]
Círculo 6, Pozo 6, Capa II, arcilla roja, 100-120 cm	SR	SR	SR
Círculo 6, Pozo 2, cala1, capa II, Bolsa 227, 1.60 m	SR	SR	SR
Círculo 6, Pozo 2, cala1, capa II, Bolsa 227, 1.60 m	SR	SR	SR
Círculo 6, Pozo 4, capa II y III, Bolsa 173, 1 m	47.2	$\sigma = 3.6$	[64 d.C.-146 d.C.]
Círculo 6, Pozo 4, 90-100 cm, capa II, arcilla roja	44.4	$\sigma = 4.0$	[79 d.C.-128 d.C.]

En las tablas 7.9 y 7.10 se muestran en rojo los intervalos con la mayor densidad de probabilidad según el programa de datación usado (Pavón-Carrasco *et al*, 2011) y empleando el modelo SHADIF.14k, solo están resaltados cuando hay más de un intervalo.

8. Palacio de Ocomo

8.1 Introducción

Diversos proyectos de campo emprendidos desde la década de los ochentas han demostrado de manera concluyente que en el Occidente de México se desarrollaron culturas con una expresión única de arquitectura monumental, grandes asentamientos y complejos sistemas de irrigación, altos perfiles demográficos, cerámicas de alta temperatura, un interesante sistema de escritura ideográfica y otros marcadores seguros de civilización mucho antes de los inicios del Postclásico (Weigand, 1996). Dichos proyectos han posibilitado recabar valiosas referencias acerca de las culturas que surgieron en el Occidente del país, esto ha permitido cambiar la perspectiva que se tenía acerca de las culturas del Occidente de México, como simples y dependientes de las culturas que se desarrollaron en la cuenca del centro de México. Este cambio de paradigma ha tenido repercusiones en el ámbito de la exploración e investigación arqueológicas, puesto que los yacimientos prehispánicos localizados en estados del Occidente de México, como es el caso de Jalisco, han ganado relevancia en las últimas décadas.

Las regiones lacustres del oeste de Jalisco son ecosistemas naturales donde abundan suelos excelentes, y el perfil de recursos escasos es superior al de la mayoría de las otras áreas de civilización temprana Mesoamérica. Obsidias de alta calidad, piedras verdiazules, varios tipos de cristales y la sal se encuentran entre los minerales que se obtenían fácilmente en esta región. Por otra parte, el régimen climático semitropical hacía posible la obtención de dos cosechas al año, si se empleaba la irrigación durante la temporada de secas. En esta región no existen barreras naturales entre la cuenca media e inferior del Lerma y los distritos lacustres. Desde Sayula en el Sur hasta Chapala en el este y Etzatlán en el noroeste. La combinación de perfiles de alta calidad para recursos tanto escasos como estratégicos ofreció un excelente trasfondo para el desarrollo de sociedades complejas (Weigand, 1996)

Como una muestra de lo anterior, vale la pena mencionar algunos de los sitios arqueológicos más significativos del estado de Jalisco: mesa de San Francisco en

Tamazula; Centro Ceremonial Ixtapa en Puerto Vallarta; Las Pilas, Huaxtla y Santa Quitería en el municipio de El Arenal; Guachimontones en Teuchitlán; Coyula en Tonalá; Atitlán, El Mirador, El Reliz y Las Cuevas en San Juanito de Escobedo; así como El Ixtépete, y El Grillo localizados en el municipio de Zapopan.

En algún momento dentro del periodo Clásico medio o Epiclásico, el Occidente de México experimentó transformaciones dramáticas. El Altiplano central parece no haber jugado un papel importante en este caso. Las tumbas de tiro típicas de la Fase Teuchitlán son reemplazadas por tumbas en forma de caja como forma dominante de entierros, como lo muestra ampliamente el sitio Tabachines (Galván, 1976; Schöndube y Galván, 1978). También surgen nuevas formas y decoraciones en las cerámicas. Las cerámicas de El Grillo son distintivas y forman un rompimiento brusco con los materiales anteriores. Surgen nuevos tipos de decoración (p. ejem; uso extensivo de pintura fugitiva, nuevos colores, nuevos diseños), así como, nuevos métodos de producción y uso de cerámicas (Beekman, 1996).

Las nuevas formas arquitectónicas son muy distintas de los círculos de la Tradición Teuchitlán de la fase anterior. Mientras que las fachadas talud-tablero del Ixtépete, El Grillo y Coyula han sido los marcadores arquitectónicos más ampliamente enfatizados hasta la fecha y comienza la arquitectura en forma de “U” encontrada en El Grillo. Se le conoce de esta manera porque se compone de un patio central con estructuras unidas en tres de los cuatro lados. La estructura más grande en el medio es una pirámide, y usualmente hay un altar ubicado hacia delante entre los extremos de las estructuras laterales. Se supone que este complejo es una nueva forma de arquitectura pública, y en casi todos los casos es el foco de asentamientos extensivos (Beekman, 1996). A esta fase pertenece el sitio arqueológico Palacio de Ocomo, que es el origen del material arqueológico estudiado en esta sección.

La tradición El Grillo rompe con la tradición Teuchitlán con características propias muy particulares, durante la fase El Grillo, las tumbas en forma de caja y el complejo cerámico asociado, reemplazan a las tumbas de tiro y de pozo como la forma dominante de entierros; esta transformación está bien documentada en el sitio de Tabachines (Galván 1976; Schöndube y Galván 1978; Aronson 1993). Las cerámicas de El Grillo son

distintivas, formando un rompimiento brusco con los materiales anteriores, formando una característica propia distinguible.

En la última década la investigación en el campo del Arqueomagnetismo ha incrementado significativamente (Carrancho et al 2015) esto ha permitido un mejor entendimiento en la dinámica poblacional y socioeconómica del área conocida como Mesoamérica constreñida en este caso a dos sitios arqueológicos del estado de Jalisco, además de alimentar el desarrollo de nuevas técnicas de datación usando material antropogénico como es el caso de los tiestos que se investigaron en esta tesis.

8.2 Contexto arqueológico de los Tiestos

La zona arqueológica denominada “El Palacio de Ocomo” es un sitio monumental ubicado en el municipio de Oconahua, en el estado de Jalisco. Pertenece a la tradición El Grillo. Se sabe que el sitio se construyó en el año 450 D.C (en uso hasta el 900 D.C) y que forma parte del mismo complejo cerámico del Valle de Tequila.

El recinto monumental de Palacio de Ocomo es uno de los Técpán más grandes del México antiguo y está constituido por cuatro plataformas que cierran un patio interior. Mide 125 metros por lado, por 6 metros de altura en su punto más alto, con plazuela exterior que mide 70 x 50 metros. Hay una plaza elevada exterior al lado Norte que mide 180 y 50 metros y el edificio en su conjunto tiene forma de una "u" semicerrada. Entre sus características constructivas más notorias está el hecho de que en realidad la estructura es resultado de la fusión de cuatro plataformas independientes. Sobresale un complejo habitacional, fogones y escalinatas en perfecto estado de conservación.

Además, es considerado un edificio monumental y característico de este estilo en el Occidente de México, ya que mide más de 1000 metros cuadrados de superficie; es también el punto clave del epiclásico para entender la arqueología de gran parte de Jalisco.

Muestra 1 (Bolsa 466): en el “Patio Norte”. En el pozo 2888 en la capa XI y superior al piso 3 se ubicó un molcajete completo pero fragmentado, la tierra alrededor del mismo era de una consistencia arcillosa tipo barro, de color café claro y en la que había presencia de carbón en grandes cantidades, lo que sugiere que se trataba de una ofrenda. Se encontraron 3 puntas de obsidiana asociadas al molcajete; a unos 10 cm aproximadamente hacia el oeste se recuperó un fragmento de figurilla de cabeza de coyote de barro cocido color negro. El molcajete se encontró superior al piso 3 el cual está al mismo nivel del desplante de los muros.

Muestra 2 (Bolsa 584): en el “Patio Norte”. Frente al desplante del muro B correspondiente a la segunda etapa constructiva, se encontró un área quemada, posiblemente un fogón. La consistencia de la capa es arcillosa y muy seguramente fue la que conformó la argamasa con la que se construyó el edificio. Solamente se identificó esta área quemada. También se recolectó una gran cantidad de carbón así como fragmentos de hueso.

Muestra 3 (Bolsa 665): en la “Estructura Norte”. En el pozo 3807, piso 2 y que corresponde a la capa VII A que está al mismo nivel del desplante del muro correspondiente a la segunda etapa constructiva del edificio. Este piso está conformado por tierra compactada de consistencia arcillosa, el color cambia en diferentes puntos de la excavación y va de color café oscuro a un color café muy claro en este piso se observaron pequeñas betas de carbón las cuales fueron recolectadas.

Muestra 4 (Bolsa 1055): recolección correspondiente a la “Estructura Norte”, pozo 3996, piso 5 que se encuentra justo en el desplante del muro de la primera etapa constructiva de la estructura y que corresponde al primer piso de ocupación o el más antiguo presente en la estructura, tiene una consistencia arenosa y fue compactada para la conformación de éste, es de color café claro y hubo presencia de material cerámico y lítico. Se encontró lo que podría ser el hueso del brazo de infante. Se recolectó carbón cerca del lugar donde se encontró el hueso en el mismo nivel del piso 5.

Muestra 83: este material se recolectó en la “Unidad Habitacional”, dentro de uno de los círculos que inicialmente fueron interpretados como columnas, en la Estructura 2. Estos círculos aún siguen siendo una incógnita puesto que inicialmente fueron interpretados como bases para poste de madera que hubiesen sostenido una techumbre de material orgánico, pero una interpretación arquitectónica de tercera dimensión permitió no aceptar dicha hipótesis pues estos postes hubiesen impedido el libre tránsito de los que ahí habitaban. Debido a su importancia se tomaron muestras del material interno de cada círculo ya definido. Se encontró en el interior de un círculo correspondiente al pozo 1616 fragmentos de cerámica y carbón, se observaron dos niveles de tierra dentro de cada círculo y los fragmentos de cerámica y carbón fueron registrados en el segundo nivel de tierra.

Bolsa 638: en el “Patio Oeste”, en el interior del cuarto adosado a la estructura Norte sobre el piso 1 correspondiente a la última etapa de ocupación de la construcción, se encontró y recolectó material interesante: carbón, una pieza de cerámica posiblemente antropomorfa, un punzón de obsidiana, fragmentos de un cajete y concentración de cerámica decorada, sobresaliendo el tipo Grillo, así como restos de tierra quemada.

Bolsa 1453: en el “Patio Oeste”, en el interior del cuarto adosado, en la capa VII, piso 4, que pertenece a la etapa de ocupación más temprana del edificio, se recolectó una muestra de carbón asociada a un entierro de tipo secundario, que al parecer se trataba de un infante menor de 5 años. Los huesos aun conservados *in situ* se encontraban bastante deteriorados, por lo que se fue necesario rescatar el bloque completo. Se encontró una parte del cráneo colocado de cabeza, de modo que solo se halló parte del hueso frontal y parietal. La tierra que rodeaba los huesos fue extraída para enviarla a laboratorio y determinar si fue ofrenda junto con otro elemento. Esta tierra presentaba características especiales, contenía restos de ceniza de color blanco y gris, por lo que se podría argumentar que este cráneo junto con lo que se ofrendó, fueron quemados. La tierra era muy compacta, poco porosa. No presentó humedad. Tenía una extensión aproximada de 40 x 35 cm y un grosor de 7 a 10 cm. También se extrajo un fragmento de metate asociado al entierro. Asociado al entierro apareció un cajete completo, junto con fragmentos de cerámica (ollas de servicio). En esta

misma capa y posiblemente asociado al entierro se halló como parte de la lítica pulida una mano corta de metate manufacturado en basalto. También se encontraron dos fragmentos de cerámica decorada, al parecer procedentes de piezas distintas, son de pasta fina, decorados con pintura roja y negra con líneas blancas como parte de la técnica decorativa.

Bolsa 1549: en el “Patio Oeste”, dentro de la capa III A Se recolectó carbón que se extrajo de una intrusión de ceniza. El material lítico y cerámico encontrado apareció cubierto por una fina capa de ceniza con tierra, estos restos quizás sean el producto de un fogón, el cual tiene un tamaño de 80 x 85 cm y un grosor de 13 cm, probablemente usado por los constructores del edificio. Este fogón aparece justo a la altura del desplante del muro de contención 1. Por lo que se infiere que es contemporáneo al a construcción del muro. Se halló una gran cantidad de fragmentos de cerámica prehispánica así como de lítica tallada. De este contexto se extrajeron la mayor cantidad de muestras posibles para interpretar si fue utilizado para la cocción de alimentos o fue provocado por algún tipo de incendio o se trata de un espacio dedicado para alguna otra actividad en específico.

a)

Tabla 8.1 a) y b) Relación de tiestos estudiados en este trabajó.

b)

Tiestos Proyecto Oconahua Serie 1		Tiestos Proyecto Oconahua Serie 2	
Información Arqueológica		Información Arqueológica	
Bolsa 466 Muestra (1) Pieza A		Bolsa 584 Muestra (2) Pieza B	
Bolsa 466 Muestra (2)		Bolsa 637 Muestra (2)	
Bolsa 664 Muestra (83) Pieza B		Bolsa 1453 Muestra (3) Pieza B	
Bolsa 664 Muestra (83) Pieza C		Bolsa 275 Muestra (1)	
Bolsa 665 Muestra (3) Pieza A			
Bolsa 1055 Muestra (4) Pieza A			
Bolsa 1055 Muestra (4) Pieza C			
Bolsa 1549 Muestra (1) Pieza A			

8.3 Preparación de las muestras

Se investigaron 12 tiestos -material usual para la determinación de arqueointensidad- proporcionados por los arqueólogos encargados del sitio, estos tiestos provienen de las estructuras del sitio denominadas: “Patio Norte”, “Estructura Norte” “Patio Oeste” y

“Unidad Habitacional”. A cada tiesto se le hace un registro fotográfico para evitar pérdida de información.

De cada tiesto se obtienen 6 cortes los cuales se orientan en un sistema cartesiano de referencia arbitrario con la finalidad de corregir o disminuir el efecto de una posible anisotropía de termorremanencia (Morales *et al*, 2012, 2013, 2015), por lo tanto se obtuvieron 72 especímenes, a los cuales se les dividió en dos series, por razones de capacidad del horno ASC TD48 con el que se trabajó.

Los especímenes son conformados como pastillas de sal, las cuales se logran embebiendo los cortes del tiesto de 1cm cúbico en sal pulverizada, esta se comprime con ayuda de una prensa de 20 toneladas en un cilindro de metal no magnético diseñado específicamente para este fin. De esta manera se obtienen cilindros de sal de 2.54 cm de diámetro y 2 cm de alto, lo cual es un requerimiento del magnetómetro JR6 de AGICO con el que se realizaron todas las mediciones de magnetización remanente.

8.4 Dataciones de carbono 14 para Palacio de Ocomo.

Las dataciones de carbono 14 disponibles para este sitio provienen de restos de carbón en el mismo contexto arqueológico que los tiestos estudiados. Estas muestras de carbón fueron enviadas, en el marco de esta investigación, a Beta Analytic. Inc un laboratorio de datación AMS carbono catorce para su datación, y calibradas con el programa www.calpal-online.de, para su uso en anno domini.

Tabla 8.2 Relación de dataciones por carbono catorce, para los tiestos de la primera serie

Tiestos. Proyecto Oconahua y dataciones por radiocarbono relacionadas			
Clasificación Arqueológica		Intervalos de tiempo por carbono 14	
Bolsa 466 Muestra (1) Palacio de Ocomo, Patio Norte Pieza A		Beta 373003	(610-670) dC
Bolsa 466 Muestra (2) Palacio de Ocomo, Patio Norte		Beta 373003	(610-670) dC
Bolsa 664 Muestra (83) Unidad Habitacional Estructura 2 Pieza B		Beta 373006	(725-740) dC (770-895) dC (925-940) dC
Bolsa 664 Muestra (83) Unidad habitacional Estructura 2 Pieza C		Beta 373006	(725-740) dC (770-895) dC (925-940) dC
Bolsa 665 Muestra (3) Palacio de Ocomo Estructura Norte Pieza A		Beta 373004	(645-685) dC
Bolsa 1055 Muestra (4) Palacio de Ocomo Estructura Norte Pieza A		Beta 373005	(640-680) dC
Bolsa 1055 Muestra (4) Palacio de Ocomo Estructura Norte Pieza C		Beta 373005	(640-680) dC
Bolsa 1549 Muestra (1) Palacio de Ocomo. Patio Oeste Pieza B		Beta 373002	(685-885) dC

8.5 Análisis de Magnetismo de Rocas

Utilizando un horno MS2WF Bartington se realizó el experimento de medición continua de susceptibilidad magnética con la variación de la temperatura, con el fin de conocer al mineral portador de la magnetización natural remanente a través de la temperatura de Curie (T_C) representativa, y de conocer la reversibilidad o no de los tiestos. En la Tabla 8.3 se muestran los resultados de dichos análisis del material investigado (Gogutchichvili et al, 2001). En la **figura** se exhibe uno de los estudios realizados a estas muestras mostrando el comportamiento esperado de reversibilidad y estabilidad termomagnéticas. En la tabla 8.4 se muestran los resultados de dichos análisis del material investigado.

Tabla 8.3. Temperaturas de Curie disponibles de los tiestos investigados en este trabajo.

Temperaturas de Curie Palacio de Ocomo, Oconahua Jalisco			
Serie 1	T_C (°C)	Serie 2	T_C (°C)
Bolsa 466 Muestra (1) Pieza A	495	Bolsa 584 Muestra (2) Pieza B	SD
Bolsa 466 Muestra (2)	500	Bolsa 637 Muestra (2)	SD
Bolsa 664 Muestra (83) Pieza B	SD	Bolsa 1453 Muestra (3) Pieza B	SD
Bolsa 664 Muestra (83) Pieza C	SD	Bolsa 275 Muestra (1)	SD
Bolsa 665 Muestra (3) Pieza A	565		
Bolsa 1055 Muestra (4) Pieza A	570		
Bolsa 1055 Muestra (4) Pieza C	575		
Bolsa 1549 Muestra (1) Pieza A	505		

Las temperaturas de Curie calculadas con la segunda derivada de las curvas κT (Tauxe, 1998), exhiben contenido de titanomagnetitas pobres en titanio (Hunt et al., 1995),

las curvas de calentamiento y enfriamiento son razonablemente reversibles, lo que evidencia reversibilidad térmica razonable en estas muestras.

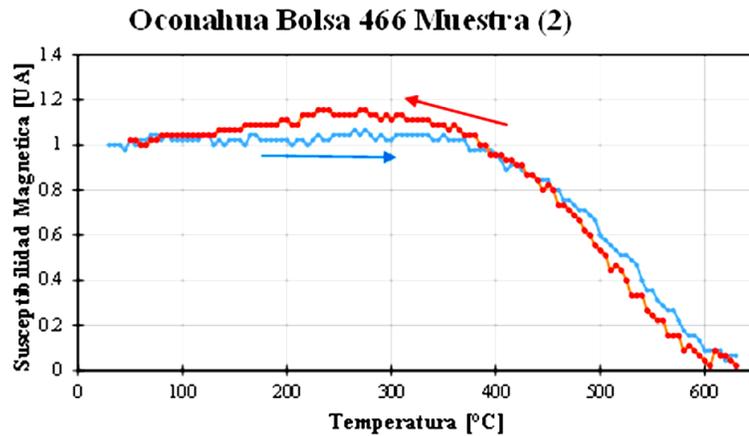


Figura 8.1 Curvas representativas de la medición continua de la susceptibilidad magnética Vs la variación de la temperatura, en azul se presenta el incremento de la temperatura, en rojo el decremento de la misma. La susceptibilidad magnética se presenta en unidades arbitrarias [UA]

8.6 Determinaciones de arqueointensidades.

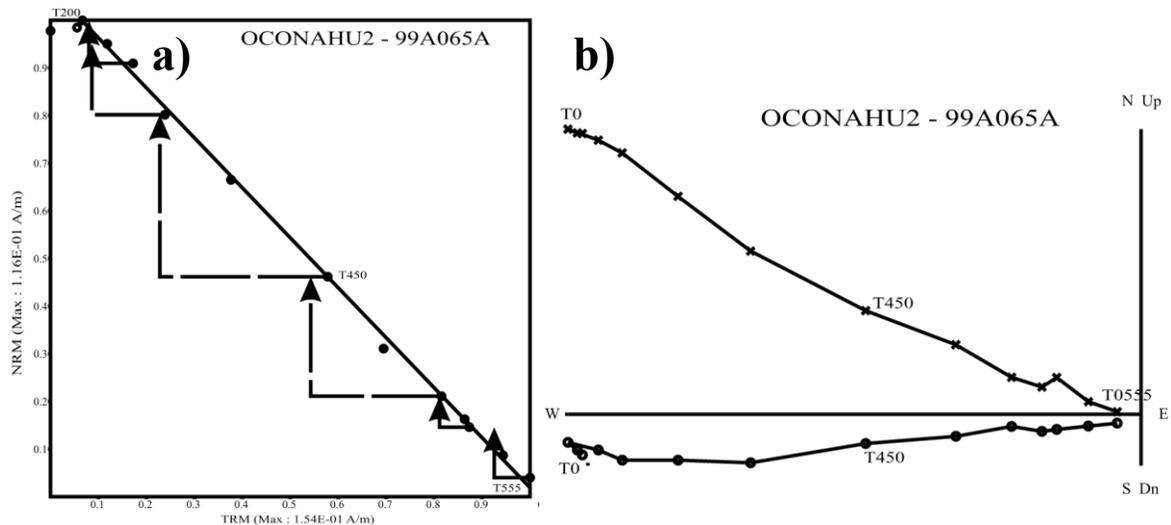
La determinación de intensidades fue realizada utilizando el método de Thellier y Thellier, (1959), modificado por Coe, (1967). Los calentamientos y enfriamientos fueron hechos en un horno ASC TD48 y las mediciones de magnetizaciones remanentes fueron realizadas con magnetómetro de giro AGICO JR6, el campo de laboratorio aplicado fue de $45 \mu\text{T}$. En dirección +z. Se aplicaron 15 pasos de incremento de temperatura los cuales fueron distribuidos entre los 100°C y 590°C . Con calentamientos sin campo conocidos como ‘pTRM checks’ realizados cada tercer paso de doble calentamiento a todo lo largo del proceso. Se llevaron a cabo dos pasos sin campo a 350°C y 475°C denominados tail check’s, con el fin de evaluar un posible estado de multidominio magnético (Riisager y Riisager, 2001). Con el objetivo de cuantificar la diferencia entre enfriar con ayuda de un ventilador –como se hace actualmente en laboratorio- y enfriar sin ayuda de uno, como se hizo al momento de la fabricación de la cerámica, se realizó un experimento al final de la determinación de arqueointensidades, denominado “cooling rate (CR)” propuesto por

Chauvin et al. 2000, y acondicionado e implementado por Morales et al, 2007, 2009. 2011, 2012, 2013, 2015, el cual consta de tres calentamientos más, con campo aplicado, a la temperatura más alta alcanzada en el experimento de determinación de intensidades, los cuales son en este caso 45 μT y 560 $^{\circ}\text{C}$, en el primero denominado TRM_{R1} , las muestras se enfrían con ayuda de un ventilador, en el segundo denominado TRM_L , las muestras se enfrían sin ayuda de un ventilador en un tiempo aproximado de 6 horas, finalmente en un paso denominado TRM_{R2} , se calientan nuevamente y se enfrían con ayuda de un ventilador, con los valores de magnetización obtenidos en los tres pasos antes descritos se calculan 2 cocientes, el primero para evaluar un posible cambio termoquímico denominado factor de transformación $f_{tr} = \frac{\text{TRM}_{R2}}{\text{TRM}_{R1}}$, si y solo si, el factor de transformación no excedió el 15% de variación, entonces se aplica la corrección utilizando el factor de corrección, $f_{cr} = \frac{\text{TRM}_{R1}}{\text{TRM}_L}$, y este factor solo se aplica cuando la corrección no excede 15%, pues de lo contrario se podría pensar en un comportamiento artificioso y no natural.

Los resultados obtenidos en la determinación de arqueointensidad se sometieron a discriminación, según los siguientes criterios de aceptación:

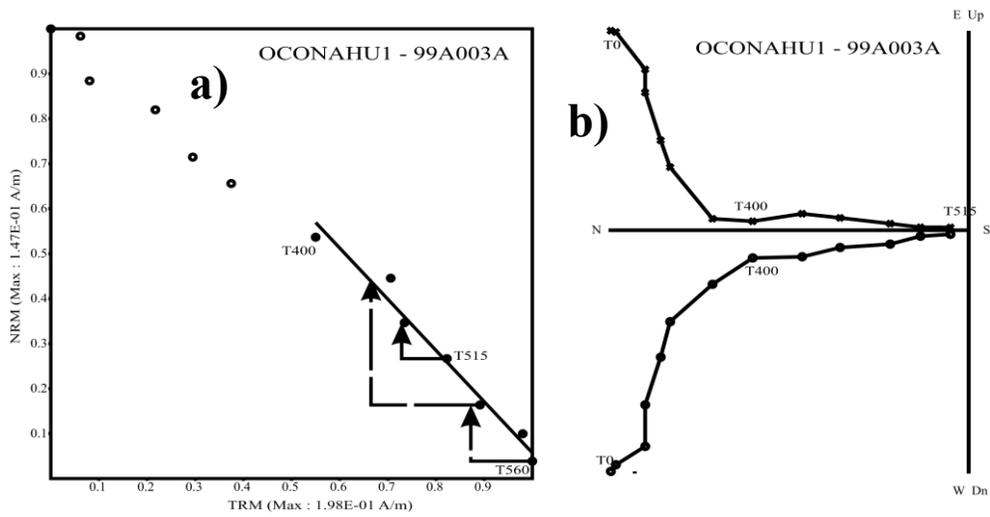
- 1) aquellos especímenes en cuyo diagrama de Arai (Nagata, 1963) es posible apreciar un comportamiento lineal, i.e., que no presentara concavidad hacia arriba, lo cual es evidencia de un posible multidominio (Levi, 1977), en un segmento que contenga al menos 5 puntos para su evaluación cuantitativa,
- 2) que la fracción de la NRM fuese superior a 70%, i.e., $f(\text{Coe}, 1978) \geq 0.7$;
- 3) que el parámetro de confianza q (Coe, 1978) tuviese un valor de al menos 5;
- 4) que los diagramas de Zijdeveld (Zijdeveld, 1967) fuesen colineales al origen;
- 5) que los pTRM checks no tuviesen una desviación superior al 10%. Aquellos resultados que cumplieron con los criterios antes descritos fueron aceptados.

Las figuras 8.2 a) Diagramas de Arai (Nagata, 1963) y b) Diagrama de Zijdeveld (1967), muestran casos típicos de los especímenes que se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta con los criterios antes descritos.



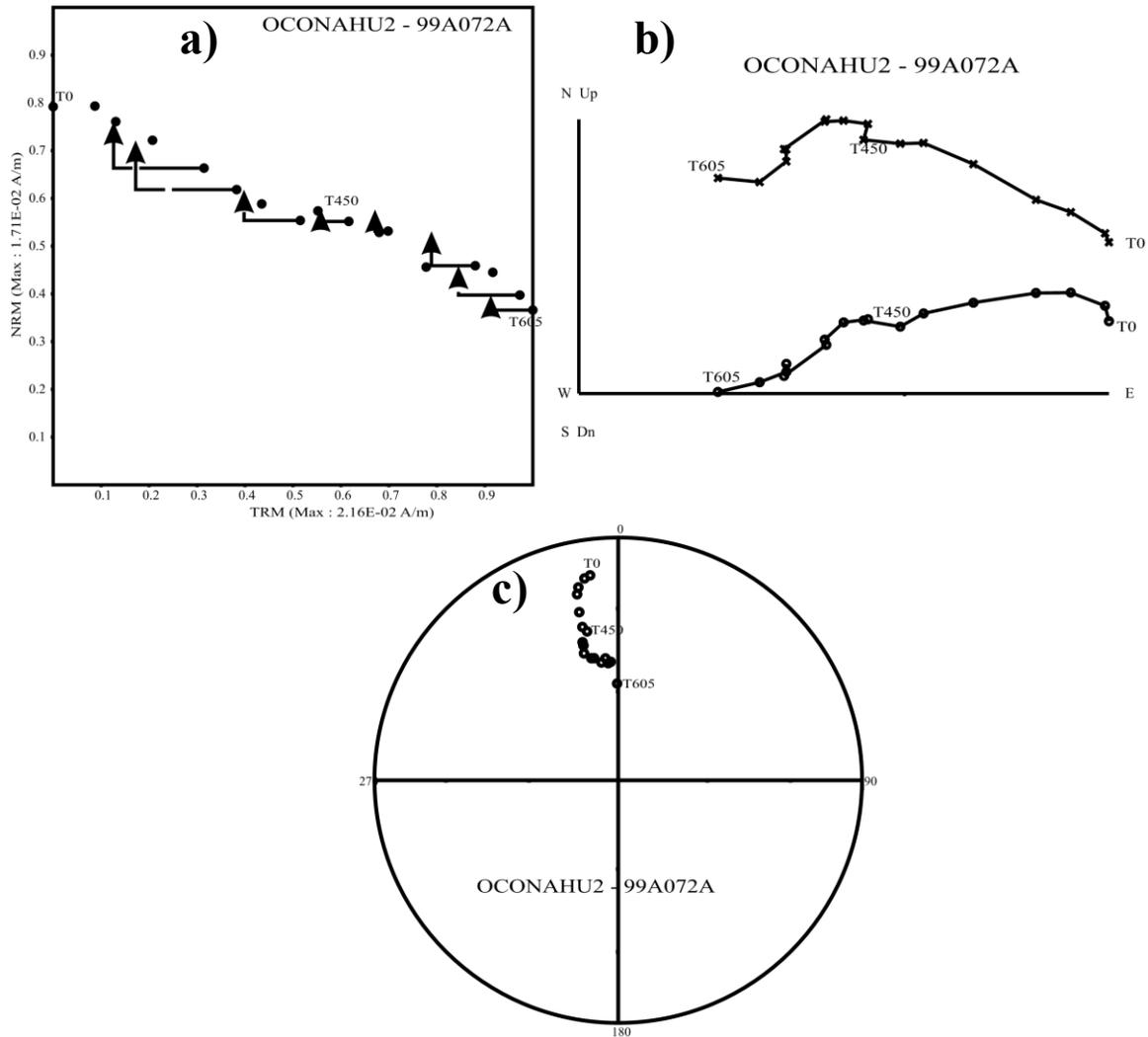
Figuras 8.2 a) Diagramas de Arai (Nagata, 1963) y b) Diagrama de Zijdeveld (1967) representativos de los especímenes que se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

También se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta los especímenes que presentaban dos componentes del vector de magnetización, sin embargo, se adaptaron los estadísticos de calidad, para tomar a éstos en consideración. En el diagrama de Arai de estos especímenes es posible apreciar un comportamiento lineal en un segmento que contiene al menos 5 puntos. Que el parámetro de confianza q (Coe, 1978) ≥ 3 . En este tipo de especímenes se aceptó que $0.7 \geq f$ (Coe, 1978) ≥ 0.3 , sin embargo la intensidad del campo geomagnético antiguo calculada en estos especímenes es cercano a la del promedio de la muestra, por lo tanto fueron aceptados, además los diagramas de Zijdeveld presentan un segmento final del vector de magnetización colineal al origen. Las figuras 8.3 muestran: a) los diagramas de Arai (Nagata, 1963) y b) los diagramas de Zijdeveld (1967) de los especímenes con las características antes descritas.



Figuras 8.3 a) Diagramas de Arai (Nagata, 1963) y b) Diagrama de Zijderveld (1967) representativos de los especímenes que se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

Los especímenes no aceptados muestran en los diagramas de Arai un comportamiento no lineal o un posible comportamiento lineal. Los diagramas de Zijderveld de estos especímenes en general no son colineales al origen, y las proyecciones estereográficas no están agrupadas a un punto, sino que de hecho siguen en círculo, lo que sugiere un cambio termoquímico inducido en laboratorio por los calentamientos a los que se someten las muestras. Las figuras 8.4 a), b) y c); exhiben los comportamientos descritos antes.



Figuras 8.4 a) Diagramas de Arai (Nagata, 1963), b) Diagrama de Zijderveld (1967) y c) Proyección estereográfica de los casos representativos de los especímenes que no se aceptaron para la determinación de la arqueointensidad absoluta.

Aplicando los criterios de aceptación antes descritos, se calculó la arqueointensidad absoluta de los especímenes y se calculó la intensidad de la muestra. En las tablas 8.4 y 8.5 se exhiben los resultados de la determinación de la arqueointensidad para las dos series de tiestos del proyecto Teuchitlán en el sitio arqueológico Guachimontones.

Tabla 8.4 Resultado de arqueointensidades, T_1-T_2 : intervalo de temperatura usado para los cálculos, f : fracción de NRM usada en la determinación, g : factor de espaciamento, q : factor de calidad; tomados de Coe (1978), n : número de pasos que intervienen en los cálculos, H_{cruda} : arqueointensidad no corregida, H_{corr} : arqueointensidad corregida con el ritmo de enfriamiento. **SR**: Sin Resultado

Tiestos del Palacio de Ocomo, Proyecto Oconahua. Serie 1												
Muestra	Espécimen	T_1-T_2 [°C]	n	f	G	q	H_{cruda} [μT]	Prom. [μT]	σ [μT]	H_{corr} [μT]	Prom. [μT]	σ [μT]
Bolsa 466 Muestra (1)	99A001A	[400-560]	7	0.40	0.81	3.7	35.05	35.0	3.6	34.36	33.9	3.6
	99A002A	[400-560]	7	0.44	0.81	4.9	38.24			37.22		
	99A003A	[400-560]	7	0.42	0.81	4.8	37.94			36.60		
	99A004A	[400-560]	7	0.42	0.82	6.9	37.80			36.35		
	99A005A	[400-560]	7	0.43	0.82	7.9	30.65			29.37		
	99A006A	[400-560]	7	0.37	0.81	5.7	30.57			29.26		
Bolsa 466 Muestra (2)	99A007A	[250-560]	10	0.67	0.85	12.0	42.26	40.0	2.8	40.23	37.7	2.9
	99A008A	[250-560]	10	0.73	0.84	10.7	39.94			37.77		
	99A009A	[250-560]	10	0.69	0.84	10.6	40.93			38.68		
	99A010A	[250-560]	10	0.68	0.84	21.1	43.30			40.88		
	99A011A	[250-560]	10	0.66	0.86	11.0	37.76			35.24		
	99A012A	[250-560]	10	0.67	0.82	17.3	36.02			33.53		
Bolsa 664 Muestra (83) Pieza B	99A013A	[400-560]	9	0.49	0.85	8.0	40.87	40.4	2.0	37.87	37.1	2.1
	99A014A	[400-560]	9	0.49	0.86	13.7	41.35			38.44		
	99A015A	[400-560]	9	0.51	0.86	16.9	42.82			39.82		
	99A016A	[400-560]	9	0.47	0.85	13.9	39.60			35.38		
	99A017A	[400-560]	9	0.50	0.86	7.2	37.01			35.43		
	99A018A	[400-560]	9	0.45	0.86	8.4	40.66			38.58		
Bolsa 664 Muestra (83) Pieza C	99A019A	[250-560]	10	0.62	0.83	7.97	43.84	43.0	2.0	42.79	41.3	2.2
	99A020A	[250-560]	10	0.80	0.86	20.0	44.57			42.74		
	99A021A	[250-560]	10	0.68	0.86	19.9	43.79			42.09		
	99A022A	[250-560]	10	0.57	0.85	9.5	44.49			43.15		
	99A023A	[250-560]	10	0.65	0.84	16.9	39.53			37.71		
	99A024A	[250-560]	10	0.64	0.85	11.7	41.83			39.53		
Bolsa 665 Muestra (3) Pieza A	99A025A	[250-560]	10	0.75	0.87	10.0	33.62	36.5	3.2	32.36	34.9	3.2
	99A026A	[250-560]	10	0.70	0.88	7.5	37.49			35.95		
	99A027A	[250-560]	10	0.66	0.88	8.6	40.53			38.87		
	99A028A	[250-560]	8	0.52	0.84	5.5	51.16			48.68		
	99A029A	[250-560]	10	0.71	0.88	8.7	34.44			32.34		
	99A030A	[250-560]	10	0.60	0.85	10.6	19.47			18.17		
Bolsa 1055	99A031A	[300-590]	11	0.76	0.89	7.9	26.21	26.9	1.0	23.65	22.8	1.3

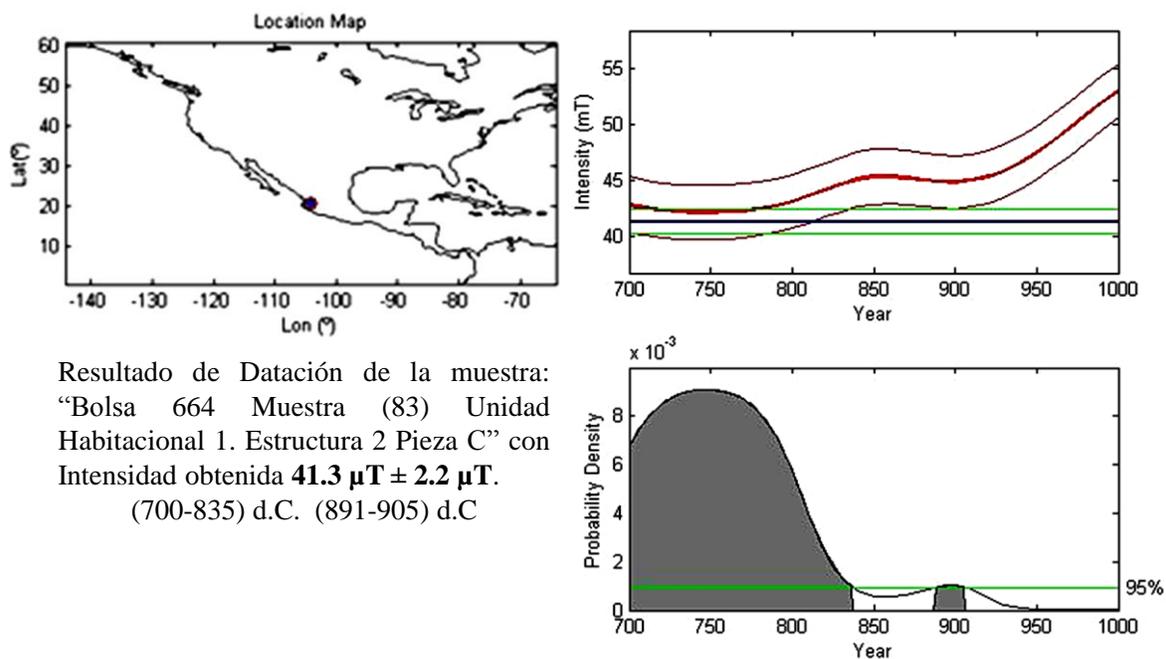
Muestra (4) Pieza A	99A032A	[300-590]	11	0.77	0.88	7.7	27.16			24.15		
	99A033A	[250-560]	12	0.83	0.89	7.9	27.32			23.76		
	99A034A	[300-575]	10	0.64	0.88	7.6	27.75			23.59		
	99A035A	[300,560]	9	0.61	0.85	11.2	25.31			20.77		
	99A036A	[300,560]	9	0.64	0.85	10.3	27.78			22.07		
Bolsa 1055 Muestra (4) Pieza C	99A037A	[250-590]	12	0.84	0.89	13.1	36.10	34.4	1.7	35.22	33.0	1.8
	99A038A	[250-590]	12	0.83	0.90	15.5	34.67			33.65		
	99A039A	[250-590]	12	0.80	0.89	16.0	34.65			33.11		
	99A040A	[250-590]	12	0.81	0.89	12.5	36.05			34.34		
	99A041A	[250-575]	11	0.64	0.88	10.7	32.25			30.96		
	99A042A	[250-575]	11	0.64	0.88	11.0	32.51			30.94		
Bolsa 1549 Muestra (1) Pieza A	99A043A	[400-560]	6	0.58	0.74	5.6	34.56	32.1	4.5	31.00	28.6	4.3
	99A044A	[400-560]	6	0.58	0.73	8.2	35.29			31.58		
	99A045A	[400-560]	6	0.58	0.76	5.4	30.98			27.87		
	99A046A	[400-560]	6	0.51	0.72	5.7	36.80			33.28		
	99A047A	[400-560]	6	0.58	0.76	6.0	24.62			21.74		
	99A048A	[[400-560]	6	0.52	0.70	4.2	30.30			26.04		

Tabla 8.5 Resultado de arqueointensidades, T_1 - T_2 : intervalo de temperatura usado para los cálculos, f : fracción de NRM usada en la determinación, g : factor de espaciamento, q : factor de calidad; tomados de Coe (1978), n : número de pasos que intervienen en los cálculos, H_{cruda} : arqueointensidad no corregida, H_{corr} : arqueointensidad corregida con el ritmo de enfriamiento. **SR**: Sin Resultado

Tiestos del Palacio de Ocomo, Proyecto Oconahua .Serie 2												
Muestra	Espécimen	T_1 - T_2 [°C]	n	f	G	q	H_{cruda} [μT]	Prom [μT]	σ [μT]	H_{corr} [μT]	Prom [μT]	σ [μT]
584 Muestra (2) Pieza B	99A0049A	SR										
	99A0050A	SR										
	99A0051A	SR										
	99A0052A	SR										
	99A0053A	SR										
	99A0054A	SR										
637 Muestra (2)	99A0055A	[525,590]	4	0.295	0.633	1.8	54.42	52.5	2.7	52.42	50.8	2.3
	99A0056A	[525,590]	4	0.320	0.651	2.1	50.66			49.23		
	99A0057A	SR										
	99A0058A	SR										
	99A0059A	SR										
	99A0060A	SR										
1453 Muestra (3) Pieza B	99A0061A	[200,560]	12	0.881	0.891	49.3	41.39	44.2	9.9	36.19	40.3	9.0
	99A0062A	[200,560]	12	0.860	0.887	43.6	43.36			38.02		
	99A0063A	[200,560]	12	0.845	0.889	44.2	44.39			44.18		
	99A0064A	[200,560]	12	0.866	0.867	36.6	63.22			56.65		
	99A0065A	[200,560]	12	0.908	0.875	64.7	35.48			31.40		

	99A0066A	[200,560]	12	0.811	0.892	33.8	37.65			35.46		
275 Muestra (1)	99A0067A	SR										
	99A0068A	SR										
	99A0069A	SR										
	99A0070A	SR										
	99A0071A	SR										
	99A0072A	SR										

El primero de ellos exhibe evidencia de una sola fase ferrimagnética con temperaturas de Curie que son compatibles con titanomagnetitas pobres en titanio. Las curvas de calentamiento y enfriamiento son razonablemente reversibles, lo que evidencia una alta estabilidad térmica en estas muestras. Este comportamiento se presenta en la mayoría de las muestras estudiadas. Figura 12 A). El segundo comportamiento exhibió la presencia de dos fases ferrimagnéticas durante el calentamiento y dos durante el enfriamiento. Estas observaciones son características de titanomagnetitas, ricas en Ti para la fase de baja temperatura (entre 200 y 250°C) y pobres en Ti para la de alta (alrededor de 575°C). Figura 11 B). El tercer comportamiento reveló la existencia de dos fases termomagnéticas distintas durante el calentamiento: una con un punto de Curie compatible con titanomagnetita rica en titanio, y la otra compatible con titanomagnetita relativamente pobre en Titanio. En el enfriamiento sin embargo, se aprecia una sola fase termomagnética, razón por la cual la curva se considera irreversible. Figura 12 C). [Readman y O'Reilly, 1972; Özdemir, 1987].



Resultado de Datación de la muestra:
 “Bolsa 664 Muestra (83) Unidad
 Habitacional 1. Estructura 2 Pieza C” con
 Intensidad obtenida $41.3 \mu\text{T} \pm 2.2 \mu\text{T}$.
 (700-835) d.C. (891-905) d.C

Figura 8.5. Ejemplo de datación arqueomagnética usando el modelo global SHAdif14K (Pavón Carrasco et al., 2011 y 2014) para tiesto del Palacio del Ocomoc. UH1 Estructura 2 Pieza C

Tabla 8.6 Resultados de determinación de arqueointensidad y correlación temporal.

Tiestos del Palacio de Ocomoc. Proyecto Oconahua. Serie 1						Intervalo de tiempo asociado por Arqueointensidad Usando Pavón-Carrasco 2011 SHA.DIF.14k
Información Arqueológica	Arqueointensidad Obtenida [μT]		Arqueointensidad Corregida (CR) [μT]		Intervalos de tiempo por radio carbono	
Bolsa 466 Muestra (1) Palacio de Ocomoc Patio Norte. Pieza A	35.0	$\sigma = 3.6$	33.9	$\sigma = 3.6$	Beta 373003 (610-670) d.C	(639-670) d.C.
Bolsa 466 Muestra (2) Palacio de Ocomoc Patio Norte. Fragmento asociado a molcajete	40.0	$\sigma = 2.8$	37.7	$\sigma = 2.9$	Beta 373003 (610-670) d.C	(610-617) d.C. (646-670) d.C
Bolsa 664 Muestra (83) Unidad Habitacional 1. Estructura 2 Pieza B	40.3	$\sigma = 2.0$	37.1	$\sigma = 2.1$	Beta 373006 (725-740) d.C (770-895) d.C (925-940) d.C	(730-761) d.C.
Bolsa 664 Muestra (83) Unidad Habitacional 1. Estructura 2 Pieza C	43.0	$\sigma = 2.0$	41.3	$\sigma = 2.2$	Beta 373006 (725-740) d.C (770-895) d.C	(700-835) d.C. (891-905) d.C

						(925-940) d.C	
Bolsa 665 Muestra (3) Palacio de Ocomo Estructura Norte. Capa VII A. Pieza A	36.5	$\sigma = 3.2$	34.9	$\sigma = 3.2$	Beta 373004	(645-685) d.C	(677-700) d.C.
Bolsa 1055 Muestra (4) Palacio de Ocomo Estructura Norte. Capa IV D Pieza A	26.9	$\sigma = 0.9$	22.8	$\sigma = 1.3$	Beta 373005	(640-680) d.C	(701-724) d.C.
Bolsa 1055 Muestra (4) Palacio de Ocomo Estructura Norte. Capa IV D Pieza C	34.4	$\sigma = 1.7$	33.0	$\sigma = 1.8$	Beta 373005	(640-680) d.C	(723-763) d.C.
Bolsa 1549 Muestra (1) Palacio de Ocomo Patio Oeste. Capa VII A. Pieza A	32.1	$\sigma = 4.5$	28.6	$\sigma = 4.3$	Beta 373002	(685-885) d.C	(718-770) d.C.

Tabla 8.7 Resultados de determinación de arqueointensidad y correlación temporal.

Tiestos del Palacio de Ocomo. Proyecto Oconahua. Serie 2					Intervalo de tiempo asociado por Arqueointensidad Usando Pavón-Carrasco 2011 SHA.DIF.14k
Clasificación Arqueológica	Arqueointensidad Obtenida [μT]		Arqueointensidad Corregida (CR) [μT]		
Bolsa 584 Muestra (2) Palacio de Ocomo Patio Norte Muro B17 Capa IV	S/R	S/R	S/R	S/R	
Bolsa 637 Muestra (2) Palacio de Ocomo Patio Oeste Cuarto adosado Capa IV Piso 1	52.5	$\sigma = 2.7$	50.8	$\sigma = 2.3$	(600-642) d.C. (842-870) d.C.
Bolsa 1453 Muestra (3) Palacio de Ocomo Patio Oeste Cuarto adosado Capa VIIa Entierro	40.5	$\sigma = 3.8$	37.0	$\sigma = 4.7$	(703-787) d.C.
Bolsa 275 Muestra (1) Palacio de Ocomo Estructura SE Pozo 8417 Capa VI	S/R	S/R	S/R	S/R	

En las tablas 8.6 y 8.7, se muestran en rojo los intervalos con la mayor densidad de probabilidad según el programa de datación usado (Pavón-Carrasco *et al*, 2011) y

empleando el modelo SHADIF.14k, solo están resaltados cuando el programa arroja más de un intervalo.

9. Conclusiones.

El conjunto de material antrópico analizado en esta investigación consta de 37 tiestos de cerámica y 8 bajareques, provenientes de: conjunto funerario de Loma Alta, en el sitio arqueológico de Zacapu, en el estado de Michoacán; así como del sitio Arqueológico de Guachimontones de Teuchitlán en el estado de Jalisco; y del sitio monumental denominado Palacio de Ocomo ubicado en el municipio de Etzatlán, en el estado de Jalisco. Las 45 determinaciones de la intensidad absoluta geomagnética obtenidas están contenidas en el intervalo $[22.8 \pm 1.3 \text{ y } 64.6 \pm 1.4] \mu\text{T}$, el cual se relaciona con el intervalo temporal **[50 a.C.- 1000 d.C.]**, basado sobre las dataciones de carbono 14 obtenidas de cada sitio. Los resultados se compararon con el más reciente modelo global SHADIF.14k (Pavón-Carrasco, 2011)

En los experimentos de magnetismo de rocas, es posible observar que la componente primaria de la magnetización es portada principalmente por titanomagnetitas (casi magnetita) pobres en titanio. Los granos de hematita antiferromagnética están presentes en la mayoría de las muestras estudiadas, sin embargo su contribución en la remanence termomagnética es insignificante. El análisis de ciclos de histéresis magnética apunta al dominio pseudo-sencillo y campos medios destructivos entre 20 y 40 Milliteslas.

Los tiestos pertenecientes al complejo funerario “Loma Alta” del conjunto arqueológico de las lomas en Zacapu, aportan información respecto a la variación temporal de la intensidad del campo geomagnético en el estado de Michoacán para los últimos mil años. Se tomaron en consideración las dataciones por carbono catorce disponibles para el conjunto funerario de “Loma Alta”, el contexto arqueológico de donde provienen los tiestos tiene un intervalo de tiempo asociado obtenido con carbono 14 de **[100 a.C. a 600 d.C.]**.

Se analizaron 120 especímenes provenientes de 20 tiestos. Para determinar la intensidad absoluta se utilizó el método de *Thellier y Thellier* (1959), modificado por Coe (1967). Los resultados fueron corregidos por dos factores: el de la anisotropía de magnetización termorremanente y el de la velocidad de enfriamiento sobre la adquisición de intensidad.

Se realizaron pilotos de desmagnetización por campos alternos, a fin de identificar a los mejores candidatos para la determinación de la arqueointensidad, (Dunlop, 2011) además se realizó el experimento de la variación continua de la susceptibilidad magnética contra la variación de la temperatura para caracterizar la mineralogía magnética de las muestras. En la mayoría de ellas se detectó la presencia de titanomagnetita pobre en titanio como el principal portador paleomagnético. En otras se observó una segunda fase que indica la coexistencia de titanomagnetitas tanto pobres como ricas en titanio.

Tres clases de comportamientos generales fueron identificadas durante los experimentos de Thellier-Coe. Las muestras del Tipo I, caracterizadas por segmentos lineales en los diagramas de Arai-Nagata y verificaciones de *pTRM* menores a un 10% de la magnetización remanente inicial. El diagrama de Zijderveld presenta una sola componente al origen. Las muestras del Tipo II, el diagrama Arai-Nagata es lineal en un segmento que contiene al menos 5 puntos, y con verificaciones de *pTRM* menores a un 10% de la magnetización remanente inicial, sin embargo, el diagrama de Zijderveld muestra dos componentes de magnetización. Finalmente, en las muestras Tipo III, el diagrama de Zijderveld presenta componentes de magnetización desviadas del origen, aunque en el diagrama Arai-Nagata se observa linealidad y estabilidad térmica mediante verificaciones de *pTRMs.*, lo que podría indicar cambio termoquímico [Soler Arechalde *et al.*, 2006], inducido por el procedimiento experimental, este comportamiento no es previsible en los pilotos que se realizaron para la preselección de muestras, pues los pilotos se desmagnetizaron por campos alternos.

La aplicación de las correcciones de anisotropía de magnetización termorremanente y de ritmo de enfriamiento tuvo una tendencia general a reducir la desviación estándar de la media de las intensidades, confirmando la importancia de realizar estas correcciones en este tipo de estudios. De manera general los valores de arqueointensidad corregida fueron menores a los no corregidos, lo que era de esperarse pues con la segunda parte del experimento de ritmo de enfriamiento se permite que un mayor número de dipolos se alineen con respecto al campo aplicado en laboratorio y esto se refleja en un incremento en la magnetización termorremanente parcial obtenida en laboratorio, y por consiguiente una disminución en el campo magnético calculado.

Los resultados de arqueointensidad obtenidos en éste trabajo, para el sitio “Loma Alta”, están comprendidos en el intervalo **$63.0 \pm 6.1 \mu\text{T}$ a $34.3 \pm 2.8 \mu\text{T}$** , los cuales al ser comparados con el modelo global de intensidad SHADIF.14k, implementado por Pavón-Carrasco para Matlab en 2011 y corregidos geográficamente al sitio arqueológico, arrojan una temporalidad comprendida en el intervalo temporal [**100 a.C. a 600 d. C.**]

Éstos resultados indican que es difícil tratar de establecer una tendencia en las variaciones de intensidad en la región mesoamericana utilizando las bases de datos y las predicciones de los modelos globales existentes, lo cual podría corresponder a un sesgo provocado por las regiones de donde se obtuvieron la mayor parte de los datos que se integran en dichos modelos. De ahí la importancia de trabajos como éste para llegar a conocer mejor las variaciones de intensidad del campo magnético antiguo de la zona.

La consolidación de una curva de arqueointensidad geomagnética para el occidente de Mesoamérica con datos como los que se aportan en esta investigación permitirá no solo conocer mejor las variaciones de intensidad de la región, sino llegar a perfeccionar la herramienta de datación arqueomagnética como un método directo para los grupos de arqueólogos que así lo requieran.

De los 15 tuestos que dieron lugar a 90 especímenes pertenecientes al denominado “*Circulo 6*” del conjunto arqueológico conocido como Guachimontones, se obtuvieron 9 nuevas determinaciones de arqueointensidad cuyos valores están entre **$23.9 \pm 1.7 \mu\text{T}$ y $59.3 \pm 6.3 \mu\text{T}$** aportando información respecto a la variación temporal de la intensidad del campo geomagnético en el estado de Jalisco para los últimos mil años. Además se obtuvieron 7 nuevas determinaciones de 8 piezas que dieron lugar a 48 especímenes del material conocido como bajareque, las determinaciones están contenidas en el intervalo **$38.7 \pm 4.5 \mu\text{T}$ y $52.0 \pm 2.5 \mu\text{T}$** . para un periodo de mil años.

Con los resultados de este trabajo de investigación se aportan intensidades que mejoran el conocimiento del campo magnético terrestre para la zona occidente de México, para el intervalo de tiempo [**50-900**] d.C. Además se aportan datos para, en un futuro próximo, generar una curva de variación secular regional y mejorar así la herramienta de la datación por arqueointensidad.

En arqueología una de las grandes preguntas ha sido ¿cuándo sucedió?, y en ese sentido las investigaciones en arqueointensidad han probado ser una herramienta fiable situar a los materiales arqueológicos en un intervalo de tiempo, y de esta manera ampliar el conocimiento de la dinámica humana, además de que en el caso de las cerámicas, las cuales son por si mismas evidencias de un desarrollo complejo de las tecnologías y de la complejidad de las sociedades humanas.

Por otro lado desde el punto de vista de la geofísica se amplía el conocimiento de la intensidad de campo geomagnético, el cual es un tema hito dentro de la geofísica, ampliar el conocimiento en esta área apunta a entender la posible relación que tiene el campo magnético con temas de sonoridad extrema en los últimos años, como por ejemplo: el comportamiento de la atmosfera desde tiempos inclusive prehistóricos, y poder integrar este conocimiento a las dinámica actual de la humanidad.

Si bien es posible aplicar la metodología empleada en esta investigación a distintos materiales antrópicos, el estudio de la cerámica tiene un particular interés, ya que la tecnología necesaria para su fabricación apunta a un conocimiento especializado y a un alto desarrollo socio-económico, y permite plantear nuevas hipótesis acerca de la dinámica humana que imperaba al momento de la fabricación de este material, o hipótesis que implique relación con fenómenos naturales que modificaron la dinámica humana. Además es importante tener en consideración que la cerámica ha sido un elemento constante en todos los hallazgos arqueológicos lo cual la coloca en un material ampliamente estudiado y disponible para la investigación. [Aronson. 1993].

Considerando que la calidad del trabajo realizado en laboratorio es buena y que las restricciones impuestas a los parámetros de calidad no son laxos, se tienen que considerar las discrepancias observadas en la comparación con el modelo global, la comparación de estos resultados junto con las intensidades de los estudios de determinación de arqueointensidad absoluta más recientes como lo son: Rodríguez-Ceja et al 2009, Morales et al 2009, Petronille et al 2012, Aguilar-Reyes et al 2013, Fanjat et al 2013, permiten resaltar a la vista que las intensidades obtenidas de los tiestos con clasificación “*círculo 6, pozo 6, capa II, arcilla roja 100-120 cm*”, del cual se obtuvo una arqueointensidad de 23.9 ± 1.7 [μT] y del tiesto con clasificación “*círculo 6, pozo 2, cala I, capa II, bolsa 227, 1.60m*” del cual se obtuvo una arqueointensidad de 29.6 ± 2.3 [μT] son más bajas en casi

35% en comparación con las calculadas para el mismo periodo de tiempo y región geográfica por el modelo global SHADIF.14K, lo cual induce a conjeturar que los modelos globales sobre estiman el valor de la intensidad de campo magnético para la región de Mesoamérica correspondiente con el Occidente de México, con lo cual se apuntala la hipótesis de una curva de variación secular desarrollada con los datos obtenidos en Mesoamérica pues se observa un desplazamiento hacia abajo de este grupo de datos de intensidades arqueomagnéticas pero las variaciones siguen en general un mismo patrón a lo largo del último milenio.

Las determinaciones de intensidad absoluta de campo geomagnético antiguo rescatada de 12 tiestos que dieron lugar a 72 especímenes, pertenecientes al sitio arqueológico denominado “Palacio de Ocomo” aporta información respecto a la variación temporal de la intensidad del campo geomagnético en el estado de Jalisco para los últimos mil años. En el intervalo específico temporal de **[610 – 940] d.C.**

El material arqueológico investigado, el cual es un material típico para la determinación de intensidad arqueomagnética, muestra en este caso un 83 % de éxito en la determinación de la arqueointensidad absoluta, lo cual es un buen resultado desde el punto de vista de procedimiento experimental.

Se obtuvieron 10 nuevas determinaciones de intensidad cuyos valores están entre **$22.8 \pm 1.3 \mu\text{T}$ y $50.8 \pm 2.3 \mu\text{T}$.**

La investigación multidisciplinaria demuestra ser un complejo sistema de intercambio de información entre disciplinas que hasta hace pocos años se pensaban inconexas, que en los casos de éxito, aporta información enriquecedora para las partes involucradas y promete un futuro vasto.

Con fin de seleccionar a los mejores candidatos para la determinación de la arqueointensidad y de conocer a los minerales portadores de la magnetización termorremanente se realizó el experimento kT, pues se mejora el resultado de las determinaciones si se preseleccionan los materiales que se desean investigar (Dunlop, 2011).

En los casos de éxito experimental la correlación temporal entre las fechas provista por el carbono 14 obtenido de material asociado a la cerámica, (cuando se tiene ésta información) y el modelo que se aplicó usando el programa de Pavón-Carrasco, es buena, sin embargo hay que considerar que los materiales usados por las dos técnicas de datación son distintos, aunque estén relacionados por el contexto arqueológico del que fueron obtenidas, no implica de manera unívoca una relación de temporalidades, si consideramos el escenario en el cual la pieza cerámica fue cocida en el año digamos n y el humano de donde se obtuvo el material usado para la datación por carbono 14 murió en el año m , y entre n y m hay una diferencia de digamos tres décadas, el valor obtenido de intensidad de campo no sería correcto para la fecha aportada por el carbono 14, esto toma un mayor peso si consideramos que la calidad técnica experimental de los resultados es muy buena, con lo que tenemos que considerar, si para la construcción del modelo se tiene que incorporar mayor evidencia arqueológica que solo las fechas obtenidas por una u otra técnica de datación.

La hipótesis anterior toma fuerza si consideramos que las determinaciones de arqueointensidad correspondientes a los tiestos con clasificación: “*Bolsa 1055 Muestra (4), Palacio de Ocomo, Estructura Norte. Capa IV D, Pieza A*” al cual le corresponde una determinación corregida de: 22.8 ± 1.3 [μ T], así como del tiesto con clasificación “*Bolsa 1055, Muestra (4), Palacio de Ocomo, Estructura Norte, Capa IV D, Pieza C*” al cual le corresponde una determinación corregida de: 33.0 ± 1.8 [μ T] y del tiesto con clasificación “*Bolsa 1549, Muestra (1), Palacio de Ocomo, Patio Oeste. Capa VII A, Pieza A*” al cual le corresponde una determinación corregida de: 28.6 ± 4.3 [μ T], son 20% más bajas que el valor calculado para el mismo intervalo de tiempo y región geográfica, por el modelo SHADIF.14k (modelo usado de comparación en este trabajo).

Referencias bibliográficas

- Aguilar Reyes, B., A. Goguitchaichvili, J. Morales, V. H. Garduño, M. Pineda, C. Carvallo, T. G. Morán, I. Israde, and M. C. Rathert, 2013. An integrated archeomagnetic and C¹⁴ study on pre-Columbian potsherds and associated charcoals intercalated between Holocene lacustrine sediments in Western Mexico: Geomagnetic implications, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 2753–2763, doi:10.1002/jgrb.50196.
- Aitken, M. J., Alcock, P. A., Bussell, G. D., Shaw, C. J., 1981. Archeomagnetic determination of the past geomagnetic intensity using ancient ceramics: allowance for anisotropy. *Archaeometry*, 23 (1), 53-64.
- Aitken, M. J., Allsop, A. L., Bussell, G. D., and Winter, M. B., 1988. Determination of the intensity of the Earth's magnetic field during archeological times: Reliability of the Thellier technique, *Rev. Geophys.*, 26, 3–12.
- Aitken M. J. 1990. *Science-based Dating in Archaeology*. Longman Archaeology Series. Longman Group UK. P 56-119
- Alexandrescu, M., Ha Duyen, C., Le Mouel, J.L., 1994. Geographical distribution of magnetic observatories and field modelling. *J. Geophys. Res.* 46, 891–901.
- Alva-Valdivia, L. M., Morales, J., Goguitchaichvili, A., Popenoe de Hatch, M., Hernández-Bernal, M. S. Mariano-Matías, F. 2010. Absolute geomagnetic intensity data from preclassic Guatemalan pottery. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 180, 41-51. doi: 10.1016/j.pepi.2010.03.002
- Arnauld; M., Carot, P., Fauvet-Berthelot M. 1993. *Arqueología de Las Lomas en la Cuenca lacustre de Zacapu. Michoacán. Cuaderno de Estudios Michoacanos 5*. Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos, México.
- Arnauld, M., Faugère-Kalfon B.. 1998. Evolución de la ocupación humana en el Centro-Norte de Michoacán (Proyecto Michoacán, CEMCA) y la emergencia del Estado Tarasco, en *Génesis, culturas y espacios en Michoacán*. V. Darras (ccord.). CEMCA. México.
- Aronson, M., A. 1993, *Technological change: West Mexican mortuary ceramics*. Ph.D. dissertation, Department of Materials Science, University of Arizona.
- Beekman, C. 1996. *El Complejo El Grillo del centro de Jalisco: una revisión de su cronología y su significado en "Las cuencas del Occidente de México: época prehispánica*. P. Weigand y E. Williams (editores). Colegio de Michoacán, CEMCA y ORSTROM, México.
- Ben-Yosef, E., Tauxe, L., Ron, H., Agnon, A., Avner, U., Najjar, M. and Levy, T. E., 2008a. A new approach for geomagnetic archeointensity research: insights on ancient

metallurgy in the Southern Levant. *J. Archeol. Sci.*, 35(11), 2863–2879.
doi:10.1016/j.jas.2008.05.016.

- Ben-Yosef, E., Ron, H., Tauxe, L., Agnon, A., Genevey, A., Levy, T. E., Avner, U. and M. Najjar, 2008b. Application of copper slag in geomagnetic archeointensity research. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(8), B08101. doi:10.1029/2007JB005235.
- Bloxham, J. and Jackson, A., 1992. Time-dependent mapping of the magnetic field at the core-mantle boundary. *J. Geophys. Res.* 97, 19537–19563.
- Bol'shakov, A.S., Shcherbakova, V.V., 1979. A thermomagnetic criterion for determining the domain structure of ferrimagnetics. *Izv. Akad. Nauk. SSSR*, 15, 111-117.
- Böhnel, H., Morales, J., Caballero, C., Alva, L., McIntosh, G., Gonzales, S., Sherwood, G.J., 1997. Variation of rock magnetic parameters and paleointensities over a single Holocene lava flow. *J. Geomag. Geoelectr.* 49, 523-542.
- Böhnel, H., Molina-Garza, R. 2002. Secular variation in Mexico during the last 40,000 years. *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 133, 99–109
- Bowles, J., Gee, J., Hildebrand, J. and Tauxe, L., 2002. Archeomagnetic intensity results from California and Ecuador: evaluation of regional data. *Earth Planet. Sci. Letters*, 203, 967-981.
- Brandt, M., Costanzo-Álvarez, V., 1999. A preliminary archaeomagnetic study of prehistoric Ameridian pottery from Venezuela. *Interciencia.* 24. 293-299.
- Bucha, V., Taylor, R., Berger, R. and Haury, E., 1970. Geomagnetic intensity: changes during the past 3000 years in the western hemisphere. *Science* 168, 111–114.
- Buck, C.E., Kenworthy, J.B., Litton, C.D., Smith, A.F.M., 1991. Combining archaeological and radioarbon information: a Bayesian approach to calibration. *Antiquity*, 65: 808–821
- Butler, R. F., 2004. Paleomagnetism. Magnetic domains to geologic terranes. Electronic Edition
- Cach Avendano, E. O., 2008. El palacio de Ocomo, exploración de una estructura: Jalisco, México FAMSI ©
- Cárdenas, E. 2013. Mesoamérica y la tradición cultural del Occidente mexicano. *Arqueología Mexicana.* Volumen XXI, número 123. Editorial Raíces/ INAH. México.
- Carlut, J., Courtillot, V. 1998. How complex is the time-averaged geomagnetic field over the past 5 Myr?, *Geophysical Journal International*, 134(2): 527-544.

- Carot, P., Susini, A., 1989. Una práctica funeraria insólita en el Occidente: la cremación y pulverización de Osamentas humanas. *Trace* 16. pp 112-114.
- Carot, P. 1992. La cerámica protoclásica de Loma Alta, municipio de Zacapu, Michoacán: nuevos datos en Origen y desarrollo de la civilización en el Occidente de México, B. Boehm de Lameiras y P. Weigand (coords.). El Colegio de Michoacán. México.
- Carot, P. 1994a. Loma Alta, antigua isla funeraria en la ciénega de Zacapu (Michoacán) en *Arqueología del Occidente de México* (E. Williams y R. Novella, coords.). El Colegio de Michoacán y Universidad de Guadalajara. México.
- Carot, P. 1994b. Cronología de la ocupación en Loma Alta, Zacapu, Michoacán o los antecedentes de la cultura purépecha. Trabajo presentado en la XXII Mesa Redonda de la Sociedad Mexicana de Antropología, Villahermosa, del 7 al 13 de agosto de 1994. México.
- Carot, P. Fauvet-Berthelot, M., 1996. La monumentalidad del sitio de Loma Alta, Michoacán, revelada por métodos de prospección geofísica en Las cuencas del Occidente de México: época prehispánica, E. Williams y P. Weigand (eds.). Colegio de Michoacán, ORSTOM, CEMCA. México.
- Carrancho, Á., Villalaín, J. J., Angelucci, D. E., Dekkers, M. J., Vallverdú, J. and Vergès, J. M., 2009. Rock-magnetic analyses as a tool to investigate archeological fired sediments: a case study of Mirador cave (Sierra de Atapuerca, Spain). *Geophys. J. Int.*, 179(1), 79–96. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04276.x
- Carrancho, Á. and Villalaín, J. J., 2011. Different mechanisms of magnetization recorded in experimental fires: Archeomagnetic implications. *Earth Planet. Sci. Letters*, 312(1-2), 176–187. doi:10.1016/j.epsl.2011.10.006.
- Carrancho, Á., Morales, J., Goguichaishvili, A., Alonso, R., Terradillos, M., 2014. Thermomagnetic monitoring of lithic clasts burned under controlled temperature and field conditions. Implications for Archeomagnetism, *Geofísica Internacional* 53: 473–490. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)70079-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7169(14)70079-0)
- Carrancho, Á., Gogichaishvili, A., Kapper, L., Morales, J., Soler Arechalde, A.M., Tema, E., 2015 Geomagnetic Applications in Archeology: State of the art and Recent advances. In: Eppelbaum, L.V. (Ed.), *New Developments in Paleomagnetism Research: The Story of the Earth's past Magnetic Field*. Nova Science (In Alphabetic Order).
- Casas, L.I., Incoronato, A., 2007. Distribution analysis of errors due to relocation of geomagnetic data using the 'conversion via pole' (CVP) method: Implications on archeomagnetic data. *Geophys. J. Int.*, 169, 448–454.
- Chadima, M., Hroudá, F., 2006. Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Travaux Géophysiques*, XXVII, 20-21

- Chauvin, A; García, Y., Lanos, Ph., Laubenheimer, F., 2000. Paleointensity of the geomagnetic field sites from France. *Physic of the Earth and Planetary Interiors*. 120: 111-136.
- Chauvin, A., Roperch, P., Levi, S., 2004. Reliability of geomagnetic paleointensity data: the effects of the NRM fraction and concave-up behavior on paleointensity determinations by the Thellier method. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 150: 265–286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2004.11.008>
- Chiari, G., Lanza, R., 1997. Pictorial remanent magnetization as an indicator of secular variation of the Earth's magnetic field. *Phys. Earth. Planet. Int.*, 101, 79–83.
- Chiari, G., Lanza, R., 1999. Remanent magnetization of mural paintings from the Bibliotheca Apostolica (Vatican, Rome). *J. Appl. Geophys.*, 41, 137-143.
- Coe, R.S. 1967. Palaeointensities of the Earth's magnetic field determined from Tertiary and Quaternary rocks. *Journal of Geophysical Research*. 72: 3247-3262.
- Coe, R.S. 1978. The determination of paleointensities of the Earth's magnetic field with emphasis on mechanism which could cause non-ideal behavior in Thellier's method. *J. Geomagn. Geoelectr.* 19, 157-159.
- Coe, R.S., Riisager, J., Plenier, G., Leonhardt, R., Krása, D. 2004. Multidomain behavior during Thellier paleointensity experiments: Results from 1915. Mt Lassen flow. *Physics Earth Planet. Int.*, 147, 141-153.
- Cogné, J. P., 2003. PaleoMac: A Macintosh™ application for treating paleomagnetic data and making plate reconstructions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4 (1), 1007, doi:10.1029/2001GC000227.
- Costanzo-Álvarez, V., Suárez, N., Aldana, M., Hernández, M., Gago, J.L., Williams, W., 2006. Preliminary dielectric and rock magnetic results for a set of prehistoric Amerindian pottery from different Venezuelan islands. *Earth Planets Space*. 58. 1423-1431.
- Courtillot, V., Le Mouél, J.L., 1988. Time variations of the earth's magnetic field: From daily to secular. *Ann.Rev. Earth Planet. Sci.* 16: 389-476.
- Daly, L., Le Goff, M., 1996. An updated and homogeneous world secular variation data base. 1. Smoothing of the archaeomagnetic results, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 93 (3–4), 159-190.
- De Groot, L. V, Biggin, A. J., Dekkers, M. J., Langereis, C. G. and Herrero-Bervera, E., 2013. Rapid regional perturbations to the recent global geomagnetic decay revealed by a new Hawaiian record. *Nature Communications*, 4, 2727. doi:10.1038/ncomms3727
- De Marco, E., Spatharas, V., Gómez-Paccard, M., Chauvin, A., Kondopoulou, D., 2008. New archeointensity results from archeological sites and variation of the

geomagnetic field intensity for the last 7 millennia in Greece. *Phys. Chem. Earth*, 33, 578-595.

Dekkers, M. J., Böhnell, H. N., 2006. Reliable absolute paleointensities independent of magnetic domain state. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 248(1-2), 508–517. doi:10.1016/j.epsl.2006.05.040.

Dunlop, D.J., & Ozdemir, O., 2000. Effect of the grain size and domain state on thermal demagnetization tails. *Geophysical Research Letters*. 27, 1311-1314

Dunlop, D.J., 2007. Thellier, Émile, in *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, edited by D. Gubbins and E. Herrero-Bervera, pp. 942–945, Dordrecht, Springer Netherlands.

Dunlop, D. J. 2011. Physical basis of the Thellier–Thellier and related paleointensity methods. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. (187); 118-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2011.03.006>

Duran, M.P., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Aguilar-Reyes, B., Alva-Valdivia L.M., Oliveros-Morales A., Calvo-Rathert, M., González-Moran, T., Robles-Camacho, J., 2010. Magnetic properties and Archeointensity of Earth's magnetic field recovered from El Opeño, earliest funeral architecture known in Western Mesoamerica. *Studia Geophysica Geodaetica*. 54: 575-593. doi:10.1007/s11200-010-0035-5

Eighmy, J.L., Sternberg, R.S., 1990. *Archaeomagnetic Dating*. Arizona Press Tucson 363-393.

Espejel, C. 2013. La Relación de Michoacán. *Narraciones históricas de los purépecha*. *Arqueología Mexicana*, No. 123: 62-75. INAH. México.

Evans, M. E., Heller, F., 2003. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmagnetics*, Academic Press, San Diego, CA.

Fabian, K., Leonhardt, R., 2010. Multiple-specimen absolute paleointensity determination: An optimal protocol including pTRM normalization, domain-state correction, and alteration test. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 297(1-2), 84–94. doi:10.1016/j.epsl.2010.06.006.

Fanjat, G., Camps, P., Alva Valdivia, L. M., Sougrati, M. T., Cuevas-Garcia, M., Perrin, M., 2013a. First archeointensity determinations on Maya incense burners from Palenque temples, Mexico: New data to constrain the Mesoamerica secular variation curve. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 363, 168-180.

Fisher, R.A., 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of Royal Society, London*, p.295

Fox, J.M.W., Aitken, M.J., 1980. Cooling rate dependence of the thermoremanent magnetization. *Nature*, 283, 462-463.

- Galván, J. 1976. Rescate arqueológico en el fraccionamiento Tabachines, Zapopan, Jalisco. Cuadernos de los Centros 28. Dirección de Centros Regionales, INAH, México.
- Galván, L. J., 1991. Las tumbas de tiro del Valle de Atemajac, Jalisco, Colección Científica, Serie Arqueología 239, INAH, México.
- Gallet, Y., Genevey, A., Le Goff, M., 2002. Three millennia of directional variation of the Earth's magnetic field in Western Europe as revealed by archeological artefacts. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 131, 81-89.
- Goguitchaichvili, A., Morales, J., Urrutia-Fucugauchi, J., Soler, A.M., 2001. On the use of continuous thermomagnetic curves in paleomagnetism: a cautionary note. *Earth and Planetary science* 333: 699-704. [http://dx.doi.org/10.1016/S1251-8050\(01\)01686-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1251-8050(01)01686-X)
- Goguitchaichvili, A., Morales, J., 2003. Geomagnetic field strength during late Miocene: First paleointensity results from Baja California. *Journal of Geophysical Research*. 108, B2. Doi: 10.1029/2002JB002081
- Goguitchaichvili, A., Soler, A.M., Zanella, E., Chiari, G., Lanza, R., Urrutia-Fucugauchi, J., Gonzales, T., 2004. Pre-Columbian mural paintings from Mesoamerica as geomagnetic field recorders. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12607, doi: 10.1029/2004GL020065.
- Goguitchaichvili, A., Greco, C., Morales, J., 2011. Geomagnetic field intensity behavior in South America between 400 AD and 1800 AD: First archeointensity results from Argentina. *Phys. Earth Planet. Int.*, 186, 191-197.
- Gómez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., McIntosh, G., Osete, M. L., Catanzariti, G., Ruiz-Martinez, V. C., Núñez, J. I., 2006. First archeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula: comparison with other data from Western Europe and with global geomagnetic field models. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 7, Q12001. <http://dx.doi.org/10.1029/2006GC001476>.
- Gómez-Paccard, M., Beamud, E., 2008. Recent achievements in archeomagnetic dating in the Iberian Peninsula: application to Roman and Mediaeval Spanish structures. *J. Archeol. Sci.*, 35, 1389-1398.
- Gonzalez, S., Sherwood, G., Böhnell, H., Schnepf, E., 1997. Paleosecular variation in central Mexico over the last 30,000 years: the record from lavas. *Geophys. J. Int.* 130, 201-219.
- Gram-Jensen, M., Abrahamsen, N., Chauvin, A., 2000. Archeomagnetic intensity in Denmark. *Physics and Chemistry of the Earth*, A 25, 525-531.
- Gunn, N.M., Murray, A.S. 1980. Geomagnetic field magnitude variations in Peru derived from archaeological ceramics dated by thermoluminescence, *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 62. 345-66.

- Hagstrum, J., Blinman, E., 2010 Archeomagnetic dating in western North America: An updated reference curve based on paleomagnetic and archeomagnetic data sets. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. V.11 doi:10.1029/2009GC002979
- Halgedahl, S.L., Day, R., Fuller, M. 1980 The effect of cooling rate intensity of weak-field TRM in single-domain magnetite. *J. Geophys. Res.* 85, 3690-3698.
- Hartmann, G.A., Genevey, A., Gallet, Y., Trindade, R., Etchevarne, C., Le Goff, M., Afonso, M.C., 2010. Archeointensity in Northeast Brasil over the past five centuries. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 296, 340-352.
- Hatakeyama, T., Kono, M., 2002 Geomagnetic field model for the last 5 My: time-averaged field and secular variation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 133; 1–4, 181-215. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9201\(02\)00084-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00084-5).
- Hoffmann, K. A., Constantine, V. L., Morse, D. L., 1989. Determination of absolute paleointensity using a multi-specimen procedure, *Nature* 339, 295–297.
- Hoffman, K. A., Biggin, A. J., 2005. A rapid multiple-sample approach to the determination of absolute paleointensity. *J. Geophys. Res.*, 110(B12), B12108. doi: 10.1029/2005JB003646
- Hongre, L., Hulot, G., Khokhlov, A., 1998. An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years. *Phys. Earth Planet. Inter.* 106, 311–335.
- Hsue, T.S., 1978. Archaeomagnetic intensity data for the southwestern United States 700-1900 A.D., MS, University of Oklahoma.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M., Banerjee, S.K., 1995. Magnetic properties of rock and minerals. Chap in: *Rock Physics & Phase relations: A handbook of physical constants*. American Geophysical Union. <http://dx.doi.org/10.1029/RF003p0189>
- Hus, J., Ech-Chakrouni, S., Jordanova, D., 2002. Origin of magnetic fabric in bricks: its implications in archeomagnetism. *Phys. Chem. Earth*, 27, 1319-1331.
- Hus, J., Ech-Chakrouni, S., Jordanova, D., Geeraerts, R., 2003. Archeomagnetic investigation of two mediaeval brick constructions in North Belgium and the magnetic anisotropy of bricks. *Geoarcheology*, 18, 225-253
- Jackson, A., Jonkers, A. R. T. & Walker, M. R., 2000. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records', *Phil Trans Roy Soc London, Series A* 358(1768), 957–990.
- Jardel, E. 1994. Diversidad Ecológica y transformaciones del paisaje en el Occidente de México en Transformaciones mayores del paisaje en el Occidente de México. R. Ávila (ed.). Universidad de Guadalajara. México.

- Johnson, C., Constable, C., 1996. Paleosecular variation recorded by lava flows over the last 5Myr. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Series AA* 354: 89-141.
- Johnson, C., Constable, C. 1997. The time-averaged geomagnetic field: global and regional biases for 0-5Ma. *Geophys. J. Int.* 131 (3), 643+.
- Johnson, C., Constable, C., 1998. Persistently anomalous Pacific geomagnetic fields. *Geophysics Research Letters.* 25, 1011-1014.
- Kapper, K. L., Anesin, D., Donadini, F., Angelucci, D. E., Cavulli, F., Pedrotti, A., Hirt, A. M., 2014a. Linking site formation processes to magnetic properties. Rock- and archeomagnetic analysis of the combustion levels at Riparo Gaban (Italy). *J. Archeol. Sci.*, 41, 836–855.
- Kapper, K. L., Donadini, F., Mauvilly, M., Panovska, S., Hirt, A. M., 2014b. New directional archeomagnetic data of burned cave sediments from Switzerland and geomagnetic field variations in Central Europe. *Geophys. J. Int.* 198, 1208–1221.
- Kelly, P., Gubbins, D. 1997. The geomagnetic field over the past 5 Myr. *Geophysical Journal International.* 128: 315-330.
- Kirschvink, J.L. 1980 The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 62, 699-718.
- Kitazawa, K., Kobayashi, K. 1968. Intensity variation of the geomagnetic field during the past 4000 years in South America, *J. Geomagn. Geoelectr.* 20 7-19.
- Kono, M., Ueno, N. 1977. Paleointensity determination by a modified Thellier method, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 13, 305–314.
- Kono M., N. Ueno, Y. Onuki, 1986. Paleointensities of the geomagnetic field obtained from Pre-Inca potsherds near Cajamarca, Northern Peru, *J. Geomagn. Geoelectr.* 38 1339-1348.
- Korte, M. and Constable, C., 2003. Continuous global geomagnetic field models for the past 3000 years. *Phys. Earth Planet. Inter.* 140 (1–3), 73–89.
- Korte, M., Constable, C., 2005. Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2. CALS7K. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6 (2), doi: 10.1029/2004GC000801.
- Korte, M., A. Genevey, C. G. Constable, U. Frank, and E. Schnepp 2005. Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 1. A new global data compilation, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q02H15, doi:10.1029/ 2004GC000800.
- Korte, M. and Constable, C., 2008. Spatial and temporal resolution of millennial scale geomagnetic field models. *Adv. Space Res.* 41, 57–69.

- Korte, M., Donadini, F., Constable, C. G., 2009. Geomagnetic field for 0–3 ka: 2. A new series of time-varying global models. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q06008, doi:10.1029/2008GC002297.
- Kovacheva, M., Chauvin, A., Jordanova, N., Lanos, P., Karloukovski, V., 2009. Remanence anisotropy effect on the paleointensity results obtained from various archeological materials, excluding pottery. *Earth Planets Space*, 61, 711-732.
- Kovacheva, M., Boyadziev, Y., Kostadinova-Avramova, M., Jordanova, N., Donadini, F., 2009. Updated archeomagnetic data set of the past 8 millennia from the Sofia laboratory, Bulgaria. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q05002, doi: 10.1029/2008GC002347.
- Krása, D., Heunemann, C., Leonhardt, R., Petersen, N., 2003. Experimental procedure to detect multidomain remanence during Thellier-Thellier experiments. *Phys. Chem. Earth* 28, 681–687.
- Lanos, Ph., 2004. Bayesian inference of calibration curves: application to archeomagnetism, in *Tools for Constructing Chronologies, Crossing Disciplinary Boundaries*, Vol. 177, pp. 43–82, eds Buck, C. E. and Millard, A. R., Series: Lecture Notes in Statistics, Springer-Verlag, London.
- Lanos, Ph., Le Goff, M., Kovacheva, M., Schnepf, E., 2005. Hierarchical modeling of archeomagnetic data and curve estimation by moving average technique. *Geophys. J. Int.*, 160, 440-476
- Le Goff, M., Gallet, Y., 2004. A new three-axis vibrating sample magnetometer for continuous high-temperature magnetization measurements: applications to paleo- and archeo-intensity determinations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 229(1-2), 31–43. doi:10.1016/j.epsl.2004.10.025
- Lee S.S., 1975. Secular variation of the intensity of the geomagnetic field during the past 3,000 years in North, Central, and South America, Ph.D., University of Oklahoma.
- Levi, S., 1977. The effect of magnetite size on paleointensity determinations of the geomagnetic field. *Physics of the Earth and Planetary interiors*, 13, 245-259.
- Linford, P. 2006. Archaeomagnetic dating. En: *Physics Education*: 145-154. J. Hodsdon & English Heritage Publishing, London
- Lodge, A., Holme, R., 2009. Towards a new approach to archeomagnetic dating in Europe using geomagnetic field modeling. *Archaeometry*, 51(2), 309-322
- López-Téllez, J. M., B. Aguilar-Reyes, J. Morales, A. Goguitchaichvili, M. Calvo-Rather, and J. Urrutia-Fucugauchi (2007). Magnetic characteristics and archeointensity determination on some Mesoamerican pre-Columbian potteries: Case study of Quiahuiztlan archeological site (Veracruz, Gulf of Mexico, 900–1521 A.D.), *Geofis. Int.*, 47, 11– 18.

- Márton, P. and Ferencz, E., 2006. Hierarchical versus stratification statistical analysis of archeomagnetic directions: the secular variation curve for Hungary. *Geophys. J. Int.*, 164, 484–489, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.02873.x.
- McClelland-Brown, E., 1984. Experiments on TRM intensity dependence on cooling rate. *Geophys. Res. Lett.* 11 (3), 205-208.
- McIntosh, G., Catanzariti, G., 2006. An Introduction of Archaeomagnetic Dating. *Geochronometria*. 25: 11-18.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFadden, P.L. (1996). *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. Academic Press, San Diego, CA, p. 531.
- Michelet, D. 1993. El centro-norte de Michoacán: características generales de su estudio arqueológico regional en El Proyecto Michoacán 1983-1987: Medio ambiente e introducción a los trabajos arqueológicos. Cuadernos de Estudios Michoacanos, CEMCA. México.
- Morales, J., Goguitchaiichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., 2007. Cooling rate as a cause of systematic overestimating of the absolute Thellier paleointensities: A cautionary note. *Studia Geophysica and Geodaetica*. 51, 315-326.
- Morales, J., Goguitchaiichvili, A., Acosta, G., Gonzales –Morán, T., Alva-Valdivia, L., Robles-Camacho, J., & Hernández-Bernal, M.S. 2009. Magnetic properties and archeointensity determination on pre-columbian pottery from Chiapas, Mesoamerica. *Earth Planets & Space*, 61, 83-91. doi:10.1186/BF03352887
- Morales, J., Goguitchaichvili, A., Aguilar-Reyes, B., Pineda-Duran, M., Camps, P., Carvallo, C., & Calvo-Rathert, M., 2011. Are ceramics and bricks reliable absolute geomagnetic intensity carriers? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 187, 310-321.
- Morales, J; A. Goguitchaivili; B. Aguilar-Reyes; M. Pineda; C. Carvallo; L. Beramendi-Orozco; G. González-Hernández; A. Ontiveros. 2012. Rock magnetic and archaeointensity investigation of pottery and burned floor at the Tzintzuntzan archaeological site, Western Mexico. *Geoarchaeology: an International Journal*. 27: 521-537.
- Morales, J; A. Goguitchaivili; M. Olay-Barrientos; C. Carvallo; B. Aguilar-Reyes. 2013. Archaeointensity investigation on pottery vestiges from Puertas de Rolón, Capacha Culture. En *Search for affinity with other Mesoamerican pre-Hispanic cultures*. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 57:605-626.
- Morales, J., Fernández Martínez, G., Gogichaisvili, A., Cárdenas, E., Hernández Bernal, M.S., 2015. Archeomagnetic dating of some Pre-Columbian pottery fragments from northern Mesoamerica: Implications for the chronology of central México during the Epiclassic period. *Journal of Archaeological Science*. 4: 32-43. DOI: 10.1016/j.jasrep.2015.08.027

- Nagata, T., Arai, Y., & Momose, K., 1963 Secular Variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years. *Journal of Geophysical Reserch.* 68, 5277-5281.
- Nagata, T., K. Kobayashi, E.J. Schwarz, 1965. Archaeomagnetic intensity studies of South and Central America, *J. Geomagn. Geoelectr.* 17 399-405.
- Niederberger, C. 1987. Paléopaysages et archéologie du bassin de Mexique. Collection Etudes Mesoaméricaines. Vol. 2. CEMCA. México.
- Néel, L., 1955. Some theoretical aspects of rock-magnetism, *Adv. Phys.*, 4, 191-243.
- Noel, M. Batt, C.M. 1990. A method for correcting geographically separated remanence directions for the purpose of archaeomagnetic dating. *Geophys. J. Int.* 102, 753-756.
- Özdemir, Ö. 1987. Inversion of titanomaghemites. *Phys. Earth Planet Inter.* 125-136.
- Partridge, T; J. Shaw; D. Heslop y R.J. Clarke. 1999. The new hominid skeleton from Sterkfontein, South Africa and a preliminary assessment. *Journal of Quaternary Science.* 14: 293-298.
- Pavón-Carrasco, F. J., Osete, M.L., Torta, J. M. and Gaya-Piqué, L. R., 2009. A regional archeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3K: applications to archeomagnetic dating. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10 (3), Q03013, doi:10.1029/2008GC002244.
- Pavón-Carrasco, F. J., Osete, M. L., Torta, J., 2010. Regional modeling of the geomagnetic field in Europe from 6000 BC to 1000 BC. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q11008, doi: 10.1029/2010GC003197.
- Pavón-Carrasco, F; J. Rodríguez-González; M. L. Osete; J. M. Torta. 2011. A Matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science.* 38:408-419.
- Pereira G. 1996. Nuevos hallazgos funerarios en Loma Alta, Zacapu, Michoacán en El Proyecto Michoacán 1983-1987: Medio ambiente e introducción a los trabajos arqueológicos. Cuadernos de Estudios Michoacanos, Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos. México.
- Pétrequin, P. (coord.) 1994. 8000 años de la Cuenca de Zacapu: evolución de los paisajes y los primeros desmontes. Cuadernos de Estudios Michoacanos 6. Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos. México.
- Petronille M., Goguitchaichvili A., Morales J., Carvallo C., Hueda-Tanabe Y. 2012. Absolute geomagnetic intensity determinations on Formative potsherds (1400–700 BC) from the Oaxaca Valley, Southwestern México. *Quaternary Research.* 78: 442-443 <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2012.07.011>
- Petrovský, E., Kapička, A., 2006. On determination of the Curie point from thermomagnetic curves, *J. Geophys. Res.*, 111, B12S27, doi:10.1029/2006JB004507.

- Pineda-Duran, M., 2011. "Determinaciones de la arqueointensidad geomagnética absoluta sobre las cerámicas precolombinas del occidente de México: Implicaciones en geomagnetismo y arqueología" Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Poletti, W., Hartmann, G. A., Hill, M. J., Biggin, A. J. and Trindade, R. I. F., 2013. The cooling-rate effect on microwave archeointensity estimates, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3847–3852, doi:10.1002/grl.50762.
- Pollard, Hellen. 1996. La transformación de élites regionales en Michoacán central en Las cuencas del Occidente de México: época prehispánica. E. Williams y P. C. Weigand (eds.). CEMCA, ORSTOM, El Colegio de Michoacán, Zamora, México.
- Pollard, H.P., 1997. Recent research in west Mexican archaeology. *J Archaeol Res.* 5: 345. doi:10.1007/BF02229257
- Prévot, M., Perrin, M. 1992. Intensity of the Earth's magnetic field since Precambrian to Thellier-type paleointensity data and inferences on the thermal history of the core. *Geophys. J. Int.* 108, 613-620,.
- Prévot M., Mankinen E.A., Grommé S., Lecaille A. 1983. High paleointensities of the geomagnetic field from thermomagnetic study on rift valley pillow basalts from the mid-atlantic ridge. *J. Geophys. Res.* 88, 2316-2326
- Rada, M., Constanzo-Álvarez, V., Aldana, M., Campos, C., 2008. Rock magnetic and petrographic characterization of prehistoric Amerindian ceramics from the Dos Mosquises island (Los Roques. Venezuela). *Interciencia.* 33. 129-134.
- Readman P.W. O'Reilly, W. 1972. Magnetic properties of oxidized (cation-deficient) titanomagnetites, (Fe Ti) \square O₄. *J. Geomag. Geoelec.* 69-90.
- Riisager, P., Riisager, J. 2001. Detecting multidomain magnetic grains in Thellier paleointensity experiments. *Physics of Earth and Planetary Interiors.* 125: 111-117.
- Rodriguez Ceja, M., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Ostroumov, M., Manzanilla, L.R., Aguilar-Reyes, B., Urrutia-Fucugauchi, J., 2009. Integrated archeomagnetic and micro-Raman spectroscopy study of pre-Columbian ceramics from the Mesoamerican formative village of Cuanalan, Teotihuacan Valley, Mexico. *J. Geophys. Res.* 114, <http://dx.doi.org/10.1029/2008JB006106>.
- Schneider, D.A. Kent, D.V., 1990 The time averaged paleomagnetic field. *Reviews of Geophysics* 28: 71-96
- Schnepf, E., Lanos, Ph., 2005. Archeomagnetic secular variation in Germany during the past 2500 years. *Geophys. J. Int.*, 163, 479–490.
- Schnepf, E., Lanos, Ph., 2006. A preliminary secular variation reference curve for archeomagnetic dating in Austria. *Geophys. J. Int.*, 166, 91-96.

- Shöndube, O y J, Galván. 1978. Salvage Archaeology at El Grillo-Tabachines, Zapopan, Jalisco, Mexico en *Across the Chichimec Sea: Papers in honor of J. Charles Kelley*. C. L Riley y B.C. Hedrick (eds.). Southern Illinois University Press.
- Schöndube, O. 1987. El occidente de México: Algunas de sus características y problemas. In: *Homenaje a Román Piña Chan*, Instituto de Investigaciones Antropológicas, Serie Antropológica, No. 79, UNAM, México, pp. 403-410.
- Schöndube, O. 1994. El Occidente de México. *Arqueología Mexicana*, No. 11: 18-25, INAH, Editorial Raíces S.A. de C.V., México.
- Shaar, R., Ron, H., Tauxe, L., Kessel, R., Agnon, A., Ben-Yosef, E., Feinberg, J. M., 2010. Testing the accuracy of absolute intensity estimates of the ancient geomagnetic field using copper slag material. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 290(1-2), 201–213. doi:10.1016/j.epsl.2009.12.022
- Shaw. J., Walton, D., Yang, S., Rolph, T.C., Share, A. 1996. Microwave archaeointensities from Peruvian ceramics. *Geophysical Journal International*. 124, 241-244.
- Smith, M., Berdan, F. 2003. Spatial structure of the Mesoamerican World System en *The Postclassic Mesoamerican World*. M. Smith y F. Berdan (eds.). University of Utah Press. EUA.
- Soler-Arechalde, A.M., Sanchez, F., Rodriguez, M., et al., 2006. Archaeomagnetic investigation of oriented pre-Columbian lime-plasters from Teotihuacan, Mesoamerica. *Earth Planets and Space* 58 (10), 1433–1439
- Sternberg, R.S. 1989. Archaeomagnetic paleointensity in the American Southwest during the past 2000 years. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 56, 1-17
- Tauxe, L., 1998. *Paleomagnetic Principles and Practice*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Tauxe, L., and Staudigel, H., 2004. Strength of the geomagnetic field in the Cretaceous Normal Superchron: New data from submarine basaltic glass of the Troodos Ophiolite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(2), 16. doi:10.1029/2003GC000635.
- Tauxe, L, Banerjee, S.K., Butler, R.F., van der Voo R, 2008. *Essentials of rocks and Paleomagnetism*.
- Tauxe, L, Banerjee, S.K., Butler, R.F., van der Voo R, 2016. *Essentials of Paleomagnetism*, 4th Web Edition.
- Tema, E., Hedley, I. and Lanos, P., 2006. Archeomagnetism in Italy: a compilation of data including new results and a preliminary Italian secular variation curve. *Geophys. J. Int.*, 167, 1160-1171.

- Tema, E., 2009. Estimate of the magnetic anisotropy effect on the archeomagnetic inclination of ancient bricks. *Phys. Earth Planet. Int.*, 176, 213-223, doi: 10.1016/j.pepi.2009.05.007.
- Terán Guerrero, A., Goguitchaishvili, A., Esparza Lope, R., Morales, J., Rosas Elguera, J. Soler, AM, Cardenas, E., Urrutia-Fucugauchi, J. 2016. A detailed rock-magnetic investigation on wattle and daub building (Bajareque) remains from Teuchitlán tradition (nw Mesoamerica). *Journal of Archaeological Science: Reports*. 5, 564-573. <http://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.01.010>
- Thellier, E. 1938. Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques. Thèse de doctorat. Paris, *Ann. Inst. Phys. Globe Paris*, 16, 157-302.
- Thellier, E, Thellier, O. 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annals of Geophysics*. 15: 285-376.
- Thompson, R., Oldfield, F. 1986. *Environmental Magnetism*. Allen & Unwin. Londres.
- Urrutia-Fucugauchi, Manzanilla, L., Barba-Pingarrón, L., 1994. Propiedades magnéticas de cerámicas y arcillas de Teotihuacán y Veracruz, Mesoamérica – Caracterización y proveniencia. *Geofísica Internacional*. 33; 2: 257-270.
- Valet, J.-P., 2003. Time variations in geomagnetic intensity. *Reviews of Geophysics*, 41(1), 44. doi:10.1029/2001RG000104.
- Veitch, R. J., Hedley, I. G., Wagner, J. J., 1984. An investigation of the intensity of the geomagnetic field during Roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles. *Arch. Sci. (Geneva)*, 37 (3), 359-373.
- Walton, D., 1991. A New Technique for Determining Paleomagnetic Intensities. *J. Geomag. Geoelectr.*, 43, 333–339.
- Weigand, P.C., 1985. Evidence for complex societies during the western Mesoamerican Classic period. In Foster, M., & Weigand, P. (eds.). *The Archaeology of West and Northwest Mesoamerica*, Westview Press, Boulder, CO, pp. 47–91.
- Weigand, P. 1992. Central Mexico's influences in Jalisco and Nayarit during the Classic Period en "Resources, power, and interregional interaction". E. Shortman y P. Urban (editors). Plenum Press, Nueva York.
- Weigand, P. 1996. La evolución y ocaso de un núcleo de civilización: la Tradición Teuchitlán y la arqueología de Jalisco en "Las cuencas del Occidente de México: época prehispánica. P. Weigand y E. Williams (editores). Colegio de Michoacán, CEMCA y ORSTROM, México.
- Weigand, P.C., 1996. The Architecture of the Teuchitlan Tradition of the Occidente of Mesoamerica, *Ancient Mesoamerica*, 7(1), pp. 91–101. doi: 10.1017/S0956536100001310.

- Weigand, P.C., 2008. En Tradición Teuchitlán, editado por P. Weigand, C. Beekman y R. Esparza, El Colegio de Michoacán, Secretaría de Cultura del Estado de Jalisco, México.
- Williams, E. 2005. El antiguo Occidente de México: un área cultural mesoamericana. Versión en línea en: www.famsi.org/spanish/research/williams
- Williams, E., Weigand, P. 2001. Estudios cerámicos en el Occidente y Norte de México. E. Williams y P. Weigand (eds.). El Colegio de Michoacán. México.
- Williams, E; Weigand, P.; López L., Grove D. (eds.). 2005. El antiguo occidente de México: nuevas perspectivas sobre el pasado prehispánico. El Colegio de Michoacán, Secretaría de Cultura de Jalisco, Foundation for the Advancement of Mesoamerican Studies, Inc (FAMSI). México.
- Wolfman, D. 1990. Mesoamerican chronology and archaeomagnetic dating, a.d. 1–1200. In: Eighmy, J.L.S., Sternberg, R.S. (Eds.), *Archaeomagnetic Dating*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 261–308.
- Yang, S., Shaw, J., Rolph, T. 1993. Archaeointensity studies of Peruvian pottery - from 1200 B.C. to 1800 A.D., *J. Geomagn. Geoelectr.* 45 1193-1207.
- Yu, Y., Tauxe, L., 2005. Testing the IZZI protocol of geomagnetic field intensity determination. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6(5), 9. doi:10.1029/2004GC000840
- Yu, Y., Tauxe, L., Genevey, A., 2004. Towards an optimal geomagnetic field intensity determination technique. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 5, 1–18.
- Zananiri, I., Batt, C., Lanos, Ph., Tarling, D. and Linford, P., 2007. Archeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archeomagnetic dating. *Phys. Earth Planet. Int.*, 160(2), 97-107.
- Zanella, E., Gurioli, L., Chiari, G., Ciarallo, A., Cioni, R., De Carolis, E., Lanza, R., 2000. Archeomagnetic results from mural paintings and pyroclastic rocks in Pompeii and Herculaneum. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 118, 227-240.
- Zijderveld, J., 1967. AC demagnetization of rocks: analysis of results. In: Collinson, D., Creer, K., Runcorn, S. (Eds.), *Methods in Paleomagnetism*. Elsevier, New York, pp. 254-256.