



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

*Variación secular del campo geomagnético de
materiales arqueológicos en el centro de México*

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
ARNALDO HERNÁNDEZ CARDONA

Director de Tesis:
Dr. Luis Manuel Alva Valdivia
Instituto de Geofísica

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Junio 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.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y su Posgrado en Ciencias de la Tierra con sede en el Instituto de Geofísica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante los estudios de maestría.

Al proyecto del PAPIIT IN113117: *Paleomagnetismo en rocas volcánicas y materiales arqueológicos del norte de México: variaciones temporales del campo geomagnético e implicaciones geodinámicas*. Por su financiamiento para el trabajo de campo y laboratorio.

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

A mi tutor, el Dr. Luis Manuel Alva Valdía por el tiempo, paciencia y gran apoyo que me brindó durante la realización de este trabajo.

A la Dra. Ana María Soler Arechalde, que me brindo auxilio y consejos con los que puede dar grandes pasos.

Al Dr. Guillermo Acosta Ochoa por su observaciones y comentarios en la parte arqueológica durante las evaluaciones semestrales y la revisión de este trabajo.

Al Dr. Edgardo Cañón Tapia, que me permitió hacer uso de las instalaciones del laboratorio de Paleomagnetismo en el CICESE, además de revisar y comentar este trabajo.

Al Dr. Juan Morales Contreras por sus comentarios a este trabajo.

Al M. en C. Antonio González y al técnico Víctor Hugo Macías, por su ayuda durante el trabajo de laboratorio.

A mis compañeros del posgrado, por todos esos momentos de estudio.

Al personal del Instituto de Geofísica y del Posgrado en Ciencias de la Tierra: Araceli Chamán y Laura Mendoza, por la paciencia que me tuvieron.

Al Dr. Juan Manuel Espíndola Castro por recibirme en el inicio de esta etapa.

A mis padres y hermana, que con su apoyo y amor he salido adelante.

A Alejandra Carolina Barrios Barocio, por su apoyo incondicional, cariño y los grandes momentos que hemos compartido en estos años.

Índice general

Resumen	ix
Introducción	1
1. Campo Geomagnético	7
2. Materiales Magnéticos	10
2.1. Magnetismo de rocas en materiales arqueológicos	12
2.1.1. Susceptibilidad magnética	12
2.1.2. Dominios Magnéticos	15
2.1.3. Remanencia magnética	18
3. Arqueomagnetismo	20
3.1. Método de Arqueointensidad	21
3.1.1. Leyes de Thellier y suposiciones del método	23
3.1.2. Método de Thellier modificado y gráfica de Arai	25
3.2. Datación por arqueointensidad	29
3.3. Arqueomagnetismo en México	30
4. Método de arqueointensidad y resultados	32
4.1. Selección y preparación de las muestras	32
4.2. Validación preliminar de los materiales	34
4.3. Caracterización de la arqueointensidad	37
4.4. Corrección por rapidez de enfriamiento	39
4.5. San Gregorio	40
4.5.1. Contexto arqueológico	40
4.5.2. Resultados	40
4.5.3. Discusión	43

4.6.	Tulyehualco	45
4.6.1.	Contexto arqueológico	45
4.6.2.	Resultados	46
4.6.3.	Discusión	50
4.7.	La Joya, Veracruz	52
4.7.1.	Contexto arqueológico	52
4.7.2.	Resultados	53
4.7.3.	Discusión	55
4.8.	Plaza Gamio	59
4.8.1.	Contexto arqueológico	59
4.8.2.	Resultados	59
4.8.3.	Discusión	62
5.	Discusión y Conclusiones	64
5.1.	Conclusiones	70
	Apéndice A. Tablas de resultados y gráficas de κ vs T	74
	Bibliografía	85

Índice de figuras

1.	Localización de los sitios de estudio.	3
1.1.	Descripción vectorial del campo geomagnético sobre la superficie de la Tierra.	8
1.2.	Comparación de tres modelos de variación secular.	9
2.1.	Momento magnético de una corriente eléctrica y momento orbital angular.	11
2.2.	Ejemplo de un ciclo de histéresis.	17
2.3.	Comportamiento de un material magnético dependiendo de la temperatura.	19
3.1.	Esquema de los calentamientos - mediciones en el método de Thellier-Coe.	26
3.2.	Dos tipos de representaciones de los resultados del método Thellier-Coe.	27
4.1.	Ejemplo de fragmentos de cerámica en dos especímenes de sal comprimida.	33
4.2.	Caracterización del valor $D_{\kappa T}$ usado para identificar la reversibilidad en las curvas κ vs T	35
4.3.	Ejemplo de curva κ vs T para el sitio SG	41
4.4.	Gráfica de Day para las cerámicas del sitio SG	42
4.5.	Ejemplo de gráfica de Arai, diagrama de Zijderveld y espectro de desmagnetización para el sitio SG	43
4.6.	Relación entre los factores r_1 y r_2 para el sitio SG	44
4.7.	Ejemplo de gráficas obtenidas de la datación para el sitio SG	45
4.8.	Ejemplo de curva κ vs T para el sitio Tul	46
4.9.	Gráfica de Day para las cerámicas del sitio Tul	47

4.10. Ejemplo de gráfica de Arai, diagrama de Zijderveld y espectro de desmagnetización para el sitio <i>Tul</i>	48
4.11. Relación entre los factores r_1 y r_2 para el sitio <i>Tul</i>	51
4.12. Ejemplo de gráficas obtenidas de la datación para el sitio <i>Tul</i>	51
4.13. Ejemplo de curva κ vs T para el sitio <i>LJ</i>	54
4.14. Gráfica de Day para las cerámicas del sitio <i>LJ</i>	56
4.15. Relación entre los factores r_1 y r_2 para el sitio <i>LJ</i>	56
4.16. Ejemplo de gráfica de Arai, diagrama de Zijderveld y espectro de desmagnetización para el sitio <i>LJ</i>	57
4.17. Ejemplos de gráficas obtenidas de la datación para el sitio <i>LJ</i>	58
4.18. Ejemplo de curva κ vs T para el sitio <i>PG</i>	60
4.19. Ejemplo de gráficas obtenidas de la datación para el sitio <i>PG</i>	61
4.20. Ejemplo de gráfica de Arai, diagrama de Zijderveld y espectro de desmagnetización para el sitio <i>PG</i>	61
4.21. Gráfica de Day para las cerámicas del sitio <i>PG</i>	63
5.1. Cerámicas con multicomponentes en sus diagramas de Zijderveld.	66
5.2. Número de determinaciones obtenidas en este trabajo en comparación con los reportados por Soler-Arechalde (2014).	67
5.3. Comparación de los MDVA obtenidos en este estudio con los reportados para México en la base de datos Geomagia (Brown <i>et al.</i> , 2015) y por Soler-Arechalde (2014).	69
5.4. Diagrama de Day correspondiente a todos los sitios analizados.	71
A.1. Curvas de κ vs T para el sitio <i>SG</i>	81
A.2. Curvas de κ vs T para el sitio <i>Tul</i>	82
A.3. Curvas de κ vs T para el sitio <i>LJ</i>	83
A.4. Curvas de κ vs T para el sitio <i>PG</i>	84

Índice de tablas

2.1. Interpretación del valor de χ_{df}	14
4.1. Esquema de temperaturas usadas en los calentamientos del método de Thellier-Coe.	37
4.2. Caracterización mineralógica de las cerámicas del sitio <i>SG</i>	41
4.3. Datación de las cerámicas del sitio <i>SG</i>	42
4.4. Caracterización mineralógica de las cerámicas del sitio <i>Tul</i>	47
4.5. Datación de las cerámicas del sitio <i>Tul</i>	48
4.6. Datación por coincidencia con tipología cerámica y ^{14}C de las cerámicas del sitio <i>Tul</i>	49
4.7. Caracterización mineralógica de las cerámicas del sitio <i>LJ</i>	54
4.8. Datación de las cerámicas del sitio <i>LJ</i>	55
4.9. Caracterización mineralógica de las cerámicas del sitio <i>PG</i>	59
4.10. Datación de las cerámicas del sitio <i>PG</i>	62
5.1. Intensidad y MDVA promedio por sitio arqueológico.	68
A.1. Resumen de los resultados del método de Thellier-Coe para el sitio <i>SG</i>	75
A.2. Resumen de los resultados del método de Thellier-Coe para el sitio <i>Tul</i>	76
A.3. Resumen de los resultados del método de Thellier-Coe para el sitio <i>LJ</i>	77
A.4. Resumen de los resultados del método de Thellier-Coe para el sitio <i>PG</i>	78
A.5. Resumen de los resultados del experimento de histéresis sobre las muestras de cada sitio.	79

- A.6. Resumen de los resultados del experimento de κ vs T a altas temperaturas. Se enlistan las temperaturas de las diferentes componentes mineralógicas observadas en las curvas A.4, A.3, A.2 y A.1 y su posible portador de la magnetización. 80

Resumen

Se estudiaron materiales arqueológicos correspondientes a cerámicas y bajareques de cuatro sitios distribuidos en el centro de México, tres de ellos dentro de la Cuenca de México y uno en Veracruz. Dicho estudio se llevó a cabo por medio del método arqueomagnético, para conocer la intensidad del campo geomagnético presente en el momento de la cocción de las cerámicas o del último calentamiento a altas temperaturas del material arqueológico. Para obtener la intensidad de este campo, se siguió el método de Thellier-Coe. De los cuatro sitios se obtuvieron 28 muestras entre cerámicas y bajareques a partir de las cuales se prepararon 224 especímenes. Las intensidades obtenidas se corrigieron por el factor de la rapidez de enfriamiento. Se realizaron estudios de mineralogía magnética que comprenden la evaluación de las temperaturas de Curie en las curvas de susceptibilidad magnética contra altas temperaturas, a partir de las cuales se encontró una mayor presencia de titanomagnetitas pobres en titanio en todos los sitios, observando que en el sitio de Plaza Gamio, en el Templo Mayor en la Ciudad de México, la mayoría de las cerámicas portaban más de una componente mineralógica de titanomagnetita rica en titanio. También se realizaron los ciclos de histéresis para conocer el tipo de dominio magnético presente en los minerales portadores de la magnetización de los materiales arqueológicos. Durante el proceso de arqueointensidad, y después de cada calentamiento, se midió la susceptibilidad a alta y baja frecuencia con el objetivo de tener un mejor control de las posibles alteraciones mineralógicas concluyendo que las cerámicas agrupadas entre el 5 y el 7% para el valor de la susceptibilidad dependiente de la frecuencia, son las que presentan los mejores resultados en la determinación de la intensidad. A partir del estudio de arqueointensidad se obtuvieron valores para la intensidad de aproximadamente el 80% de todas las cerámicas. De este porcentaje solo 58% tuvieron una datación por medio del modelo de la curva de variación secular SCHA.DIF.14K. A partir de

las dataciones por ^{14}C existentes para dos sitios, las edades obtenidas por el método de arqueointensidad tuvieron coincidencias de entre el 16 y 48 % con las de radiocarbono. De los materiales del sitio La Joya en Veracruz, se obtuvieron dos intensidades, $47.7 \pm 4.7 \mu\text{T}$ y $42.5 \pm 2.1 \mu\text{T}$ para dos etapas constructivas, las cuales tienen asociadas respectivamente, dataciones de radiocarbono de [380 580] dC para la etapa inferior y de [450 570] dC en la etapa superior. El sitio de Tulyehualco en Xochimilco, también contaban con una datación de [1421 1046] aC, la cual es posible asociarla a la intensidad promedio obtenida de las cerámicas correspondientes a las fases cerámicas Nevada [1350 1250] aC y Ayotla [1250 1000] aC, con un valor de $36.3 \pm 0.86 \mu\text{T}$. Éstas intensidades, con sus respectivas dataciones, incrementan en un 4 % la información existente de la curva de variación secular del centro de México.

Introducción

“*Turbulentos*” fue la descripción que René Descartes (1586 - 1650) dio al comportamiento de lo que hoy conocemos son los campos magnéticos de ciertos materiales, cuya demostración experimental la realizó Jacques Rohault (1620 - 1675) para sustentar las hipótesis de Descartes, utilizando limadura de hierro y un imán. El magnetismo tiene sus inicios en el siglo VI aC cuando Thales de Mileto da una primera aproximación. Posteriormente, el descubrimiento y el uso de la brújula dio lugar al vínculo entre los materiales magnéticos y el campo magnético de la Tierra.

Smith (1970) considera el libro de Petrus Peregrinus’s “Epistola de Magnete” (1269), como el avance más importante en el conocimiento de los materiales magnéticos después de los griegos, y es de este libro de donde William Gilbert toma el concepto de “polos magnéticos” para formular uno de los primeros modelos (y tal vez el más conocido) que describe el campo magnético de la Tierra (Gilbert, 1893). En su libro *De Magnete*, Gilbert demuestra con un experimento sobre una esfera magnetizada, que el campo geomagnético se comporta como un imán dipolar; además, reproduce en el mismo experimento, el ángulo que ahora caracterizamos como la inclinación del campo geomagnético. Sus ideas acerca de este campo las complementa argumentando que, la proximidad del norte magnético con el norte geográfico no es coincidencia, siendo la rotación de la Tierra la causa de este magnetismo para concluir que el campo geomagnético también es axial (Stern, 2002). El campo geomagnético se caracteriza vectorialmente para cualquier punto sobre la superficie de la Tierra por medio de tres elementos magnéticos: la declinación, la inclinación y la intensidad. Durante la época de Gilbert, se realizaron mediciones globales a partir de las cuales Guillaume le Nautonier’s (1560 - 1620) crea un modelo del campo geomagnético, encontrando una variación en la declinación. Veinte años después, Edmund Gunter, profesor de astronomía en Gresham College identifica variaciones

significativas a una escala espacial mucho más pequeña que las descritas por le Nautonier's, dando paso al libro de Gellibrand (1635) quien describe por primera vez en una publicación, la variación secular de un parámetro del campo geomagnético. Paralelamente, el desarrollo y complejidad de los modelos del campo geomagnético se fueron correspondiendo con las mediciones hasta alcanzar el modelo geocéntrico del dipolo magnético usado hasta la fecha para describir este campo, su variación secular y las fuentes que originan su existencia (e.g. Alken *et al.*, 2016; Barraclough *et al.*, 1975).

Es posible describir el comportamiento del campo geomagnético por medio de la información registrada en los minerales magnéticos presentes en diversos materiales naturales, como por ejemplo rocas volcánicas, sedimentos lacustres o materiales arqueológicos. Este registro se debe a la capacidad que poseen estos minerales de adquirir remanencias magnéticas al estar inmersos en un campo magnético externo (Eighmy y Sternberg, 1990). Una de éstas remanencias es la adquirida durante el enfriamiento del material luego de haber sido calentado a temperaturas por mayores o iguales que la temperatura de Curie del mineral (Curie, 1895), temperatura a la cual el material pasa de ser ferro-, ferrimagnético a ser paramagnético. El conocimiento del valor de ésta última temperatura determina la mineralogía magnética presente en el material y puede ser obtenida a través de la medición discreta de la susceptibilidad magnética en función del calentamiento y enfriamiento del material entre la temperatura ambiente y $700^{\circ}C$, aproximadamente. También es posible caracterizar los dominios magnéticos que integran el mineral presente en los materiales por medio de los parámetros obtenidos de la curva de histéresis magnética (Day *et al.*, 1977) (las propiedades magnéticas de los materiales se detallan en el Capítulo 2). Ésta información es relevante al momento de considerar la viabilidad de una muestra para que, en función de sus propiedades mineralógicas, cumpla o no con las hipótesis del método arqueomagnético.

Con el método arqueomagnético se puede conocer el vector completo del campo geomagnético, por medio de la medición de la declinación, inclinación e intensidad de la magnetización en una muestra. Sin embargo, cuando el material no se encuentra *in situ*, como por ejemplo las cerámicas, solo será posible identificar la intensidad del campo geomagnético. Thellier (1959) desarrolló un método para conocer el valor de la intensidad del campo "antiguo", por medio de la comparación entre éste y con un campo conocido (de laboratorio). Esta comparación se realiza debido a que las termoremanencias magnéticas guardan una relación con el campo magnético

que las origina. En el método original conocido como *Thellier-Thellier*, se realiza un primer calentamiento con el campo aplicado en una dirección y en un segundo calentamiento con el campo en la dirección contraria, incrementando la temperatura en pasos discretos durante el proceso (las consideraciones del método se detallan en el Capítulo 3). Éste método forma una familia de experimentos conocida como *KTT* (Koenigsberger-Thellier-Thellier). Entre sus variantes Coe (1967) propone calentar una sola vez con un campo aplicado, mientras que el otro calentamiento se realice dentro de un blindaje magnético. Los resultados de este experimento se analizan en una gráfica ideada por Arai (1963), a partir de la cual es posible conocer la intensidad del campo geomagnético “antiguo”.

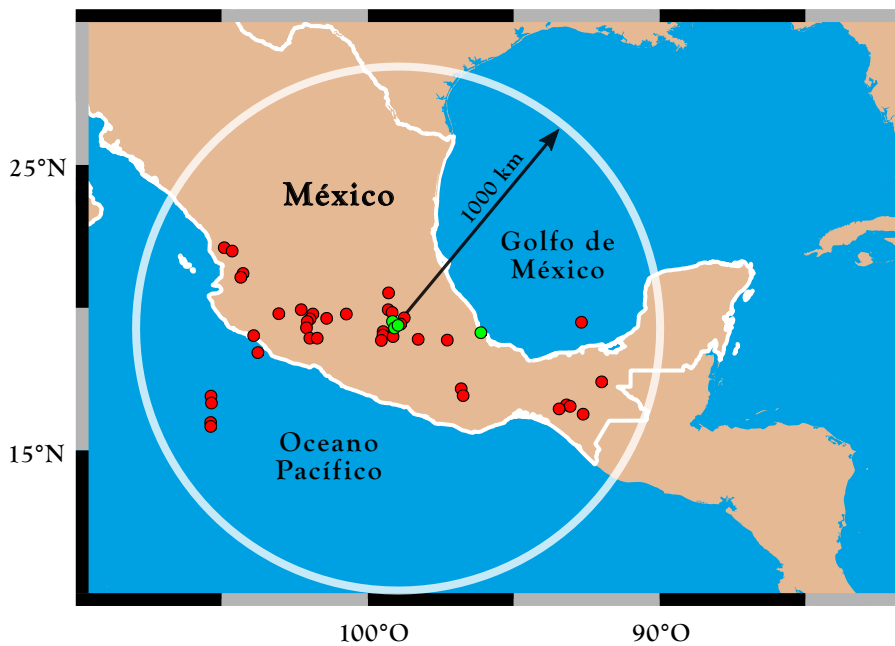


Figura 1: En verde la localización de los cuatro sitios cuyos materiales fueron estudiados en este trabajo. En rojo los datos provenientes de la base de Goemagia (Brown *et al.*, 2015) que tuvieron una coincidencia dentro de la circunferencia de 1000 km alrededor del los sitios localizados en la Cuenca de México.

Debido a que la variación secular es un fenómeno del campo geomagnético a nivel global, regional y local, se debe contar con la curva de variación secular calibrada para una zona no mayor a 1000 km de radio alrededor del sitio de donde se realiza la datación por el método arqueomagnético (Eighmy y Sternberg, 1990). Estas curvas se construyen a partir de

la información obtenida de diversos materiales (arqueológicos, volcánicos o de sedimentos lacustres Pavón-Carrasco *et al.* (2011)). Sin embargo, también es posible utilizar las curvas basadas en modelos globales como lo son SCHA.DIF.14K, ARCH3K.1 y CALS3K.4 integrados por flujos de lava y materiales arqueológicos, respectivamente para los dos primeros, y sedimentos lacustres (además de los dos tipos materiales anteriores) para el último modelo (más detalles en el Capítulo 1). Soler-Arechalde (2014) hace un recuento de los datos obtenidos con el fin de construir una curva de variación secular para el centro de México. Esta curva cubre parcialmente un periodo aproximado de 2000 años para la declinación y la inclinación, y aproximadamente 3000 años para la intensidad. Sin embargo, existen periodos donde no es suficiente la densidad de los datos para estimar fechas con suficiente precisión.

En el presente trabajo se pretende obtener datos de intensidad del campo geomagnético para incrementar la densidad de información de la curva de variación secular en el centro de México. En función de esto, se incluyen materiales arqueológicos de cuatro sitios ubicados en el centro de México. Éstos materiales arqueológicos no *in situ* comprenden cerámicas y bajareques con el objetivo de obtener la arqueointensidad por el método de *Thellier-Coe* (Coe, 1967). Todos los materiales analizados se encuentran enmarcados dentro de contextos arqueológicos y cuyas edades están delimitadas, ya sea, por su tipología cerámica, o por dataciones de ^{14}C . Para determinar sus edades por el método arqueomagnético, se utilizaron las curvas de los modelos globales ARCH3K.1 y SCHA.DIF.14K de variación secular (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014). Para ello fue necesario investigar la viabilidad de las muestras teniendo como objetivo específico la caracterización magnetomineralógica de los materiales utilizados (como se detalla en el Capítulo 4 y se discute y concluye en el Capítulo 5).

Tres de los cuatro sitios estudiados se encuentran dentro de la Cuenca de México y el cuarto ésta situado en Veracruz, aproximadamente a 6 km de la costa (Figura 1). El sitio de San Gregorio Atlapulco se encuentra al sur de la Cuenca de México siendo un sitio importante por estar vinculado con el desarrollo de la agricultura y de las primeras aldeas en esta región. La ocupación precerámica de este sitio se encuentra entre la fase Playa II (5500-4500 aC) y Zohapilco (3500-2200 aC) (McClung de Tapia y Acosta Ochoa, 2015). Este sitio arqueológico fue reportado en el estudio regional de Parsons *et al.* (1982) quienes realizaron el primer plano del sitio y sondeos en uno de los montículos de la plataforma donde localizaron por primera vez

restos humanos y determinaron una ocupación a finales del periodo Azteca (1350 a 1519 dC) que se continúa hasta inicios de la Colonia (1521 dC) (Acosta Ochoa *et al.*, 2014).

Un segundo sitio dentro de la Cuenca de México está localizado dentro de un predio al sur de la Ciudad de México en la Delegación Xochimilco en el poblado de Santiago de Tulyehualco. Su excavación fue realizada como parte de un proyecto de salvamento arqueológico. La evidencia arqueológica corresponde a las fases cerámicas Nevada, Ayotla y Manantial (2200 al 800 aC) establecida por Niederberger (1976). Los elementos olmecoides identificados en la cerámica de Tulyehualco corresponden a tres elementos básicos que son la Zarpa felina en los tipos cerámicos *Tortuga Pulido*, La Cruz de San Andrés o Cruz olmeca y la Ceja Flamígera en vasijas del tipo *Pilli Blanco*, *Pilli Rojo sobre Bayo Oscuro* y el mismo *Tortuga Pulido*. Montero G. (2016) obtuvo dataciones de la recolección de carbón en un fogón identificado con edades entre 1421 a 1046 aC. El tercer sitio dentro de la Cuenca, corresponde a la Plaza M. Gamio en el Templo Mayor en el Centro de la Ciudad de México. Las excavaciones de este sitio comienzan en 2009 y muestran las etapas constructivas IV, IVa, V y VI que van del 1440 al 1502 dC. Las cerámicas estudiadas en este trabajo son del tipo ceremonial y dos de ellas están asociadas al *Xócotl*, el árbol sagrado de los mexicas (Barrera Rodríguez *et al.*, 2012).

El cuarto sitio está localizado en la parte central del estado de Veracruz, en una zona con condiciones climáticas adversas para la construcción en arquitectura de tierra (Daneels, 2008). Los materiales analizados en este trabajo provienen de la plataforma Este del sitio. Esta plataforma tiene seis etapas constructivas englobadas en los periodos Clásico Medio y Tardío (300 - 1000 dC). En particular, la etapa IIIA fue una estructura principal con funciones residenciales. Estas estructuras eran desmanteladas y quemadas por propósitos rituales, y de los restos de este proceso Daneels *et al.* (2013) obtienen material para datación por ^{14}C que están asociadas a las cerámicas usadas en este trabajo. Los materiales asociados a la fase IIIA inferior son cerámicas (un cajete tipo Potrerillo y un incensario donde se observa cocción incompleta de la pasta) y fragmentos de bajareque quemado perteneciente a un techo, y de la fase IIIA superior se analizaron cerámicas tipo Potrerillo y bajareque quemado perteneciente a una pared y a un techo.

Fue posible obtener las intensidades registradas del campo geomagnético en el 82% de las muestras analizadas y la datación, por el método arqueomagnético, con coincidencias en su contexto arqueológico en el 32%

de ellas. Se presentaron buenas coincidencias con las dataciones existentes de ^{14}C de dos de los sitios. El uso del protocolo de Biggin y Perrin (2007) durante el método de Thellier- Coe es significativo para obtener buenos resultados en cerámicas con mezclas de dominios sencillos con multidominio. Por otro lado, los momentos dipolares virtuales axiales calculados de las intensidades obtenidas para cada muestra, se compararon con los de trabajos previos realizados en el centro de México (Brown *et al.*, 2015; Soler-Arechalde, 2014), encontrando que dos de los sitios, Tulyehuacló que se encuentra dentro de la Cuenca y el sitio de La Joya en Veracruz, tienen una buena correspondencia con ellos. La determinación de la susceptibilidad dependiente de las frecuencias obtenida en todas las cerámicas, se observa relevante en estos dos sitios, pues sus valores se agrupan entre el 5 y 7% coincidiendo con lo reportado por Pétronille *et al.* (2012), quienes destacan en su publicación, la coincidencia de las cerámicas con los mejores resultados en el método de arqueointensidad dentro de las que presentan valores en éste intervalo de susceptibilidad dependiente de la frecuencia.

Capítulo 1

Campo Geomagnético

El campo geomagnético (CGM) se puede representar de manera aproximada usando el modelo de un dipolo magnético localizado en el centro de la Tierra, y cuyo eje dipolar difiere aproximadamente 11.5° con respecto al eje de rotación de la Tierra. La aproximación a éste modelo se basa en las observaciones obtenidas por medio de mediciones del CGM sobre la superficie (en océanos y estaciones terrestres), así como las realizadas en aviones y satélites. El mejor ajuste de estos datos produce un campo axial conocido como *dipolo geomagnético axial* (GAD por sus siglas en ingles), y cuando no se consideran las restricciones geocéntricas el mejor ajuste es un dipolo excéntrico. Sin embargo estos modelos dipolares no coinciden por completo con las observaciones, esto se debe a que existen componentes del CGM *no dipolares* cuyo comportamiento dinámico ésta asociado con las fuentes del CGM (Campbell, 2003).

Para poder describir el CGM puntualmente, asumimos una esfera centrada en el dipolo y observamos las líneas de campo sobre su superficie. El vector \mathbf{H} , que describe puntualmente al campo magnético sobre la superficie, se define a partir de dos parámetros direccionales: la *declinación* (D) y la *inclinación* (I), y un parámetro de magnitud: la *intensidad* (H). En la Figura 1.1 el ángulo D corresponde al ángulo formado entre el norte geográfico y la componente horizontal de vector \mathbf{H} . La inclinación I es el ángulo complementario al formado por la vertical (sobre la superficie de la esfera es el radio) y el vector \mathbf{H} . Además, es posible cuantificar la intensidad del vector del campo geomagnético $H = \sqrt{H_H^2 + H_V^2}$. Si comparamos el valor de la intensidad del CGM con el campo producido por un imán cerámico, el primero es del orden de $50\mu T$, mientras que el segundo es del orden de

$2000\mu T$, por lo tanto la intensidad del CGM se considera muy *débil*.

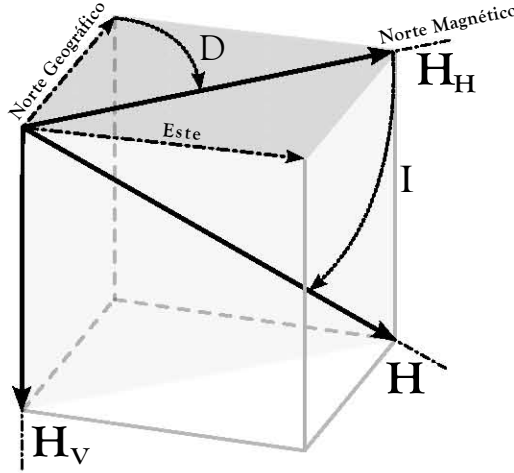


Figura 1.1: Descripción vectorial del campo geomagnético sobre la superficie de la Tierra. O punto de observación del campo, D declinación, I la inclinación, \mathbf{H} campo geomagnético, \mathbf{H}_H y \mathbf{H}_V componentes horizontal y vertical del campo respectivamente.

El CGM presenta una serie de cambios temporales que no poseen una periodicidad distintiva. Estos cambios se distinguen por tener variaciones temporales que pueden identificarse en intervalos que van del orden de segundos a millones de años. La variación secular (VS) es uno de estos y se observa debido a que todos los elementos que describen el CGM tienen una dependencia temporal (Boyle, 1691; Halley, 1692). En particular, la VS se puede definir como los cambios en la declinación, inclinación e intensidad del CGM que suceden en intervalos del orden de años.

Éste fenómeno se representa en series de tiempo de cada uno de los elementos que describe el vector del CGM. Los datos en cada una de estas curvas provienen de muestras de sedimentos lacustres, rocas o materiales arqueológicos. Las curvas de VS pueden distinguirse según el área que abarquen: locales, regionales y globales (Pavón-Carrasco *et al.*, 2011). Los modelos de las curvas *locales* se dan sobre un área no mayor a $2 \times 10^5 km^2$ o referentes a un país; y cuyo error será alrededor de los $\frac{7^\circ}{1700 km}$ (Casas y Incoronato, 2007) y $\frac{3\mu T}{1000 km}$ (Gómez-Paccard *et al.*, 2008). Por otro lado están los modelos *regionales*, algunos de ellos, generados a partir del análisis de casquete de armónicos esféricos (Spherical Cap Harmonic Analysis, SCHA)

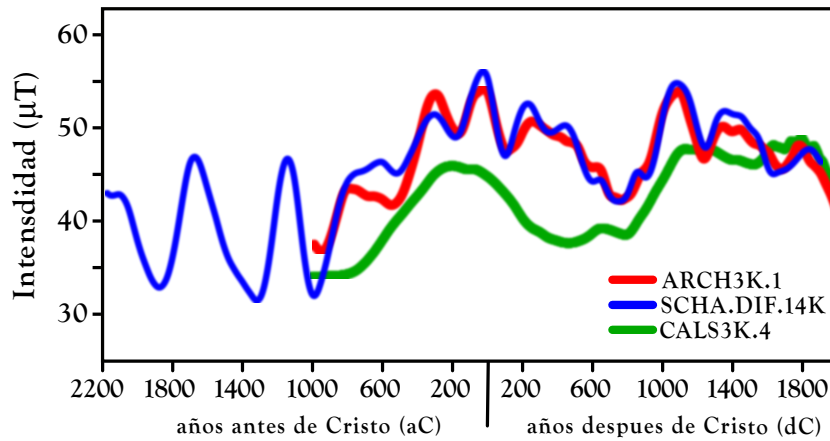


Figura 1.2: Comparación de tres modelos. En rojo el modelo ARCH3K.1, en azul el modelo SCHA.DIF.14K y en verde el modelo CALS3K.4. Este último modelo utiliza los datos provenientes de sedimentos lacustres, flujos volcánicos y materiales arqueológicos. Los dos primeros modelos utilizan datos solo de flujos volcánicos y materiales arqueológicos.

(Haines, 1985) basados en la información obtenida de los tres tipos de materiales antes mencionados.

Y finalmente los modelos *globales* (Figura 1.2), representados por los modelos *CALS* (Continuous Archeomagnetic and Lake Sediments) que incluyen datos arqueomagnéticos, de flujos de lava y sedimentos de lagos, considerados la mejor representación del campo geomagnético para datación fuera de la región euroasiática (Donadini *et al.*, 2009). Dentro de estos modelos globales (cuyos datos están incluidos en el modelo *CALS3K.4* Korte *et al.* (2009)) está la base de datos de sedimentos *SED* cuyo modelo es demasiado suavizado para obtener una datación arqueomagnética, y el modelo *ARCH* (*ARCH3K.1* su última actualización) que tiene la ventaja de no tener los factores que suavizan el modelo *SED* por ser construida únicamente con datos obtenidos de materiales arqueológicos. Finalmente, el modelo *SCHA.DIF.14K* (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014), que se considera también un modelo global, está construido a partir de esféricos armónicos para la parte espacial y con B-splines cúbicos para la parte temporal.

Capítulo 2

Materiales Magnéticos

Al observar y describir el comportamiento de las estructuras atómicas de muchos materiales naturales y sintéticos se han encontrado conductas análogas a las de los imanes que todos conocemos. Es posible entender la magnetización por medio de dos fenómenos, el primero de ellos puede ser conceptualizado imaginando una corriente eléctrica sobre una espira (a una escala microscópica). El segundo de ellos tiene que ver con los dipolos magnéticos y, a pesar de que precede históricamente a la anterior, es menos fundamental que la idea de las corrientes en una espira.

Dada una corriente I sobre una espira de área \mathbf{A} (Figura 2.1), se define un vector $\boldsymbol{\mu}$ como el momento magnético (momento dipolar magnético) del circuito

$$\boldsymbol{\mu} = I\mathbf{A} = \frac{-e}{2m_e}\mathbf{L}. \quad (2.1)$$

donde e es la carga del electrón y m_e su masa. Éste vector es una medida de la tendencia de un objeto a alinearse con un campo magnético externo \mathbf{B} , de tal forma que $\mathbf{B} \parallel \boldsymbol{\mu}$.

A nivel atómico existen dos fuentes de momentos magnéticos: el movimiento orbital de un electrón alrededor del núcleo, en donde el momento angular \mathbf{L} de dicha orbita produce un momento magnético (segundo término de la ec. 2.1), y el momento angular de espín \mathbf{S} . Este momento proviene de un fenómeno cuántico y es el que da lugar a los estados magnéticos.

Así, la magnetización \mathbf{M} de un material es el momento magnético total por unidad de volumen:

$$\mathbf{M} = \frac{\sum_i \boldsymbol{\mu}_i}{\text{volumen del material}}. \quad (2.2)$$

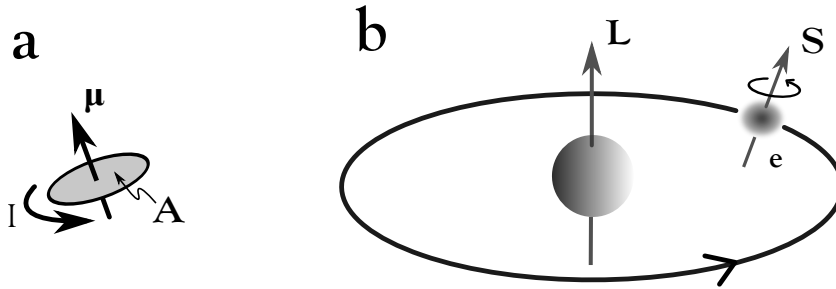


Figura 2.1: **a** se muestra el momento magnético μ de un corriente eléctrica I sobre una espira de área A . **b** se muestra el momento orbital angular L del átomo y S una idealización del espín del electrón.

La magnetización en un material se puede identificar dentro de dos tipos generales: la *magnetización inducida* y la *magnetización remanente*. La primera de ellas está asociada a la exposición del material a un campo magnético externo, mientras que la segunda se presenta en algunos materiales aún en ausencia de un campo magnético externo, siendo ésta última la que registra la información de un campo magnético aplicado al material en un tiempo pasado.

Dentro de estos estados magnéticos, el diamagnetismo es una propiedad que presentan todos los materiales según sean las condiciones mecánicas y termodinámicas a las cuales se vean sometidos. Este estado magnético sucede cuando los momentos magnéticos μ del material (dados como en el segundo término de la ec. 2.1) se alinean antiparalelamente al aplicar un campo magnético externo. Por otro lado, el paramagnetismo se describe fenomenológicamente como la alineación parcial de los momentos magnéticos permanentes de un átomo en la dirección de un campo B externo. Este comportamiento se puede resumir en un parámetro α cuando se considera un volumen finito con N momentos μ en la expresión $M = N\mu L(\alpha)$, donde $L(\alpha)$ es conocida como la función de Langevin que expresa, en una distribución de Boltzmann, todos los estados posibles dado el campo magnético externo aplicado y la respuesta del sistema magnético a la temperatura.

La dependencia en la temperatura está dada en α como

$$\alpha = \frac{\mu B}{kT} \quad (2.3)$$

que plantea un caso especial dentro de las soluciones para M cuando $T \rightarrow 0$, $\alpha \rightarrow \infty$, por lo que $L(\alpha) \rightarrow 1$ y la magnetización $M = N\mu$, que representa

la alineación completa de todos los momentos magnéticos con el campo, independientemente del incremento progresivo de B a partir de este valor del campo externo aplicado. Un segundo caso especial sucede cuando $B = 0$, $M = 0$ independientemente del incremento de la temperatura.

En el caso de los materiales ferromagnéticos y antiferromagnéticos, los factores internos son los que determinan la configuración de los momentos magnéticos. La interacción entre los espines es lo que distingue la manera en como se alinearán dentro de la estructura del material, con respecto a otros materiales en ausencia de campos magnéticos externos. Para los materiales ferromagnéticos la alineación de los espines es paralela, provocando que a temperaturas bajas exista una única orientación. En el caso de los antiferromagnéticos la alineación de los espines es antiparalela, es decir, con direcciones alternadas paralelas ocasionando una aparente ausencia de magnetización macroscópica.

2.1. Magnetismo de rocas en materiales arqueológicos

El comportamiento de los materiales magnéticos antes mencionados, ya sea que se encuentren en ambientes naturales o sean sintéticos, está sujeto a dos variables que podemos controlar para conocer sus propiedades magneto-mineralógicas. Como se distinguió anteriormente, la presencia de un **campo magnético externo** provoca que éstos materiales presenten una magnetización inducida o una remanente. Así también, la **temperatura** es un parámetro que influye fuertemente en el comportamiento, creación y transformación de minerales magnéticos. La estructura de los materiales magnéticos depende de su mineralogía, el tamaño y la forma del grano que porta la magnetización, así como los defectos presentes en el cristal. Estas propiedades pueden ser analizadas por medio de la susceptibilidad magnética y el tipo de dominio magnético conocido a partir de su ciclo particular de histéresis magnética.

2.1.1. Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética puede entenderse a primer orden, como una caracterización del vector de magnetización del material en función de la variación de un campo magnético externo aplicado a este material, siendo un

factor que relaciona la magnetización del material con el campo aplicado.

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T}. \quad (2.4)$$

Sin embargo, esta definición está restringida por la suposición de un material isotrópico y únicamente paramagnético, donde C es una constante que lo caracteriza. Dado que normalmente se tienen materiales que no cumplen estas suposiciones, la susceptibilidad deja de ser un escalar y se convierte en un tensor descrito por $\mathbf{H} = \chi_{ij}\mathbf{M}$ pero sigue conservando simetría dado que el análisis de la susceptibilidad en un material estará asociado a una estructura mineralógica agrupada en algún sistema cristalográfico.

En 1907 Pierre Ernest-Weiss incorpora un término a la ecuación 2.4, haciendo uso de la idea de un campo magnético interno en el material proporcional a la magnetización de éste

$$B_{Total} = B_{ext} + \mu_0\gamma M \quad (2.5)$$

donde γ es la constante que relaciona $H_{int} = \gamma M$. Weiss propone esta idea para explicar la magnetización espontánea de algunos materiales como el *Fe* sugiriendo que, fenomenológicamente, existen *dominios* dentro de los que se pueden promediar todos los momentos magnéticos en un vector de magnetización que caracterice a dicha región. Por lo tanto, la dependencia de la susceptibilidad con el campo y la temperatura en la ecuación 2.4 se reescribe como

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \quad (2.6)$$

A partir de esta expresión es posible definir la temperatura de Curie T_C como una propiedad de los materiales ferromagnéticos, siendo su comportamiento a $T > T_C$ como el de un *material paramagnético* (Figura 2.3). En el caso para $T < T_C$ se puede obtener una relación de la magnetización a la temperatura a partir de la descripción cuántica de la magnetización en los materiales (Cullity y Graham, 2009). El obtener la susceptibilidad en su dependencia con la temperatura entre T_{amb} y T_C (susceptibilidad a altas temperaturas) y entre los $-200^\circ C$ y T_{amb} (susceptibilidad a bajas temperaturas), ofrece un acercamiento a la mineralogía presente en el material. Esto se debe a que los diferentes minerales magnéticos tienen un comportamiento específico en

la susceptibilidad a su T_C y su temperatura de Néel (T_N , se define como la temperatura a la cual los minerales antiferromagnéticos pierden sus propiedades y se observa a bajas temperaturas). En virtud de la composición mineralógica heterogénea que pueden presentar las muestras de rocas o materiales arqueológicos, las curvas de susceptibilidad contra temperatura o las curvas termomagnéticas (magnetización de saturación contra temperatura) son el resultado del comportamiento colectivo de todas las fases mineralógicas constituyentes del material. Sin embargo, es posible identificar las fases predominantes a través de examinar los *escalones* producidos por cambios bruscos en la susceptibilidad, cuando la fase mineral sufre una transformación al aproximarse a su T_C . Es a partir de este tipo de gráficas que por medio de ajustes como los propuestos por Moskowitz (1981) y Tauxe (1998) se puede estimar T_C y por lo tanto identificar la fase mineral predominante.

Por otro lado, la susceptibilidad medida bajo la influencia de un campo débil (χ_{cd}) es utilizada para conocer la concentración de minerales ferromagnéticos (Thompson y Oldfield, 1986). A partir de relacionar los valores de susceptibilidad medida a temperatura ambiente de una gran variedad de materiales y minerales, Dearing (1999) utiliza el valor de la susceptibilidad porcentual dependiente de la frecuencia (χ_{df} %) para caracterizar semicuantitativamente la existencia o carencia de partículas superparamagnéticas (SP), así como su mezcla con partículas de dominio sencillo. Una interpretación a estos valores se da en la Tabla 2.1 (Dearing, 1999).

Este valor expresa la “pérdida” de susceptibilidad del material cuando se mide en un campo de alta frecuencia (4.65 kHz), en comparación a la medición en un campo de baja frecuencia (0.465 kHz). Esta diferencia explora el proceso de magnetización que sucede en los cristales superparamagnéticos al introducirlos en un campo magnético.

Baja χ_{df} %	< 2	inexistencia virtual de granos SP
Media χ_{df} %	2 – 10	mezcla de granos SP + granos irregulares $\neg SP$ o granos SP < 0.005 μm
Alta χ_{df} %	10 – 14	existencia total de SP
Muy alta χ_{df} %	> 14	mediciones erróneas, muestras anisotrópicas, débiles o contaminadas

Tabla 2.1: Interpretación del valor de χ_{df} .

2.1.2. Dominios Magnéticos

La existencia de los dominios fue propuesta por Weiss (1907) para explicar porqué dos piezas de hierro no se atraen entre sí. La hipótesis de Weiss planteaba la existencia de zonas localizadas dentro de un material con comportamientos ferromagnético, creadas por la interacción entre *campos internos*. La formación de estas zonas, que llamó *dominios magnéticos*, la asoció a una pérdida en la magnetización del volumen completo del material. Este fenómeno lo describió únicamente para los materiales ferromagnéticos, encontrando que la magnetización de cada dominio puede orientarse de tal forma que, el material no exhiba propiedades magnéticas o por otro lado, que los dominios se reorienten por medio de procesos que posteriormente se explicaran para que en el material se observe la presencia de un campo magnético.

Las observaciones experimentales de la existencia de los dominios la realizó por primera vez Barkhausen (1919), que midió los “brincos” que se producen en la magnetización cuando los límites de los dominios se desplazan. La trascendencia de la hipótesis de Weiss está en la existencia de las paredes de los dominios conocidas por *paredes de Bloch*. En un sentido clásico, éstas se definen como la región donde la magnetización cambia de dirección de un dominio a otro.

En general, un *grano magnético* puede ser clasificado de acuerdo al dominio que lo componga:

- *Dominio sencillo* (DS). Que es el caso mas simple, presentando un grano (partícula) magnético que contiene un solo vector de magnetización preferente para todos los momentos magnéticos presentes en el grano.
- *Dominio pseudo-sencillo* (DPS). Cuyo término fue acuñado por Stacey (1963) para denotar granos de tamaño ligeramente mayores a los de DS, siendo su estructura (de paredes) pobremente definida y deformada en comparación de DS y DM.
- *Dominio múltiple* (DM). Granos que presentan paredes de Bloch.

Es gracias al trabajo de Néel (1949), que puede darse una descripción cuantitativa a los DS. Esta teoría se fundamenta en la suposición de que la magnetización en los granos ultrafinos que contienen DS, pueden cambiar por medio de la rotación de su único momento magnético (Dunlop, 2011).

Este cambio, en unidades de tiempo, se da por las perturbaciones energéticas producidas principalmente por la temperatura, considerando que los granos están inmersos en un campo débil (del orden del campo geomagnético, i.e. $\leq 100\mu T$). El cambio recibe el nombre de tiempo de relajación τ (ecuación 2.7), donde el término energético $\Delta E = \mu_0 V M_S H_c$ depende del volumen V que contenga la región por analizar, la magnetización de saturación M_S , suma de todos los momentos y del campo coercitivo H_C (ver sección de Histéresis magnética 2.1.2).

$$\tau^{-1} = 2f_0 e^{\frac{-\Delta E}{kT}} \quad (2.7)$$

donde $f_0 \approx 10^9 - 10^{10} s^{-1}$ y kT es la energía térmica.

La aproximación del valor de τ para rocas y materiales arqueológicos puede llegar a ser imposible de conseguir, sin embargo la característica mas importante de éste parámetro magnético está en su relación con la temperatura, ya que cada grano tendrá un único valor τ asociado a una temperatura a partir de la cual, y durante el enfriamiento del material, los momentos magnéticos encontrarán un estado de equilibrio y los vectores que los describen no cambiarán su dirección ni intensidad. Ésta temperatura es conocida como la *temperatura de bloqueo* T_B para dicho grano.

La identificación de los DPS pero principalmente de los DS, tiene gran relevancia cuando se estudia la intensidad de magnetización registrada en un material debido a que este tipo de granos producen los mejores resultados (ver Sección 3.1.1); a diferencia de los DM, cuya dependencia entre el tamaño de grano y la temperatura provoca resultados poco fiables (Dunlop, 2011).

Histéresis magnética

La rama del magnetismo llamada *micromagnetismo* es la que se encarga de determinar los ciclos de histéresis a través de parámetros locales como $K_1(\mathbf{r})$ (la lineación magnética en el elipsoide que representa la anisotropía de susceptibilidad magnética (Tarling y Hrouda, 1993)) y $M_S(\mathbf{r})$ (la magnetización de saturación); además de caracterizar los fenómenos que se presentan con la existencia de dominios magnéticos y sus paredes.

Existen muchas formas de representar gráficamente los ciclos del fenómeno de histéresis magnética (Skomski, 2008), sin embargo, el mas usado en la rama del magnetismo de rocas y materiales arqueológicos son las curvas $M - H$ donde la magnetización se gráfica contra el campo externo aplicado sobre el material.

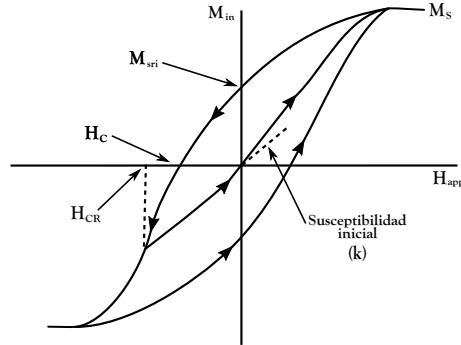


Figura 2.2: Ejemplo de un ciclo de histéresis.

La magnetización medida en un material $\mathbf{M}(\mathbf{r})$ (M_{in} en la Figura 2.2) es finalmente expresada en una medición por la coexistencia energética entre los fenómenos de intercambio interatómico, la anisotropía, la energía Zeeman y la interacción magnetoestática. La histéresis se produce debido a la evolución de los mínimos en la energía magnética de éste sistema, donde contribuyen fenómenos complejos no lineales y no localizados. Es decir, sucede cuando la magnetización se “acumula” en un mínimo de energía local, y con el tiempo, es desplazado por un campo magnético exterior, provocando un “brinco” de la magnetización a otro mínimo local, teniendo como resultado final una dependencia transitoria de este proceso que finalmente se vuelve iterativo (Skomski, 2008).

El ciclo de histéresis es uno de los métodos clásicos para conocer el tamaño de grano y la coercitividad, propiedades magnéticas que caracterizan la mineralogía y el comportamiento de la remanencia magnética en el material. Los parámetros que caracterizan este ciclo (identificados en la Figura 2.2) pueden ser representados en una *gráfica de Day*, en la cual, Day *et al.* (1977) propone una racionalización de las magnetizaciones M_{sr}/M_s (donde $M_{sr} = M_{sri}$ de la Figura 2.2) y de los campos H_{cr}/H_c . A partir de esta gráfica se obtiene una aproximación para los tamaños de dominio, cuyos límites se definen para titanomagnetita TM60 ($Fe_{2.4}Ti_{0.6}O_4$) de DS en $M_{sr}/M_s \geq 0.5$ y $H_{cr}/H_c \leq 1.5$ mientras que para DM como $M_{sr}/M_s \leq 0.05$ y $H_{cr}/H_c \geq 4$.

En este tipo de gráficas, corregidas y analizadas por Dunlop (2002a) y Dunlop (2002b), propone identificar el tipo de dominio de los portadores de la magnetización en el material, calculando curvas teóricas de mezclas entre dominios DS, DPS y DM. Sin embargo, son los valores $0.15 \leq M_{sr}/M_s \leq 0.3$

y $2 \leq H_{cr}/H_c \leq 3$ para dichas razones (Dunlop, 2002b) los que se usan en este trabajo para identificar estos dominios.

2.1.3. Remanencia magnética

Todos los minerales magnéticos presentan la propiedad de poder registrar el vector de cualquier campo magnético dentro del cual se encuentren. Esta información puede ser registrada por los granos o los dominios magnéticos presentes en los materiales magnéticos. A esta información se le conoce como *remanencia natural magnética* (**RNM**) cuando es adquirida de forma natural (e.g. vulcanismo, metamorfismo, etc.), al momento de la cocción o un calentamiento posterior de una pieza arqueológica, o en general, al registro magnético en el material previo a su estudio. La forma en cómo se registra esta información depende de varios fenómenos y se da en diversos procesos dependiendo del material estudiado. Sin embargo, y según su origen, se pueden dividir en procesos conocidos y estudiados para diferentes escenarios. Las más conocidas son las remanencias: térmica, detrítica, viscosa, química, isothermal y la anhisterética, de las cuales se pueden encontrar variantes y combinaciones según su historia evolutiva.

La remanencia que nos interesa en este estudio es la térmica debido a que se considera que los materiales utilizados sufrieron un calentamiento-enfriamiento durante su formación o un recalentamiento-enfriamiento durante su uso posterior. Para comprender el mecanismo de adquisición de esta remanencia es preciso entender los factores que influyen en ella (Ozima y Ozima, 1965).

La *termoremanencia magnética* (**TRM**) resulta de los cambios producidos en la magnetización del material debido a una excitación térmica. Estos cambios se llevan a cabo cuando un mineral magnético se encuentra inmerso en un campo magnético débil (de baja intensidad como el campo de la Tierra) y posteriormente se enfría por debajo de su T_C (Figura 2.3). La magnetización que adquiere el grano en su o sus dominios magnéticos es paralela o contiene una componente direccional del campo magnético que produjo la alineación, siendo la intensidad de esta magnetización, proporcional a la intensidad del mismo campo.

En el caso de los materiales arqueológicos, esta remanencia se adquiere al momento de su cocción (en el caso de cerámicas) o durante su último recalentamiento (como en los materiales usados para la preparación de alimentos o ceremoniales que involucran el uso de fuego). Este tipo de

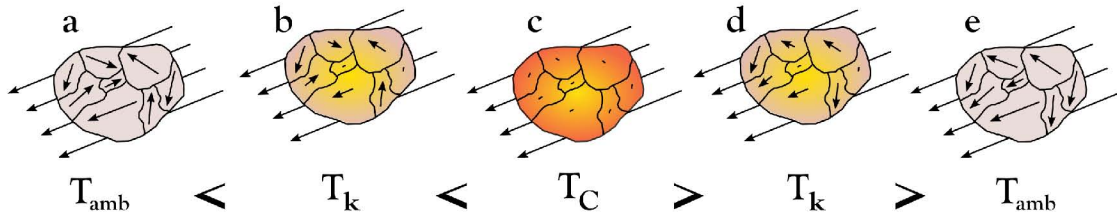


Figura 2.3: Esquema del comportamiento de un material magnético con la temperatura inmerso en un campo magnético externo. **a** los momentos magnéticos están orientados aleatoriamente. **b** dada $T_k < T_C$ algunos dominios pierden su magnetización. **c** el material llega a su T_C y se vuelve paramagnético. **d** durante el enfriamiento, alguna componente vectorial de los momentos magnéticos se alinea paralelamente al campo externo. **e** El material registra la dirección e intensidad del campo magnético externo.

materiales son perfectos para determinar la arqueointensidad del campo geomagnético debido a que la magnetización adquirida tiene una intensa señal magnética y los minerales magnéticos se estabilizan física y químicamente por debajo de la T_C , y específicamente, en la temperatura de bloqueo que (recordando de la Sección 2.1.2) se puede entender como el equilibrio que se presenta entre la energía térmica y la de las paredes de Bloch.

En lo anterior se ha considerado que la termoremanencia se adquiere a una temperatura conocida (T_C). Sin embargo, también se puede definir la *termoremanencia magnética parcial* (**TRMp**), producida en virtud de que todas las rocas naturales y materiales arqueológicos tienen una distribución $f(V, H_c)$ de temperaturas de bloqueo desconocida *a priori*. Cuando en el material se observan DS, esta distribución depende del volumen del grano y de la coercitividad. Es por ello que, al medir una *TRMp*, se reconoce que la magnetización es debida a un grupo de granos que tienen valores (V, H_c) idénticos o similares, i.e. cuando un material con un ensamble de DS se enfría de una temperatura T_i a $T_{j < i}$ dentro de un campo, la temperatura de bloqueo será tal que $T_{j < i} \leq T_B \leq T_i$ y la magnetización estará dada por $M_{TRMp}(T_i, T_{j < i}, H)$. Es esta magnetización en su idealización vectorial a partir de la cual Thellier (1938) encuentra que los DS siguen ciertas reglas experimentales que se explicaran en el siguiente Capítulo.

Capítulo 3

Arqueomagnetismo

En un principio el arqueomagnetismo se desarrolló más que como un método de datación, como una forma de investigar las propiedades magnéticas en las cerámicas y caracterizar el campo geomagnético. Las aplicaciones del arqueomagnetismo no se restringen solo a las dataciones, también se pueden estudiar los usos y costumbres alrededor de fogatas, hornos o fogones (McCrone, 2000), determinar la posición durante la cocción de una pieza (ladrillos y cerámicas entre otros), estimar la contemporaneidad de dos piezas o estructuras (Hus y Geeraerts, 2003), e incluso identificar la temperatura de calentamiento del material arqueológico (Hammond, 2014).

Boyle (1691) demuestra la adquisición de una dirección magnética paralela a un campo magnético externo cuando un trozo de arcilla se enfría dentro de él; y Halley (1692) discute la variación secular y la deriva al oeste del campo geomagnético. Estos dos famosos ingleses, proporcionaron los fundamentos bajo los cuales se desarrollaría el arqueomagnetismo. Dos siglos después Gheradi (1862) publica un trabajo que es considerado como el primer acercamiento real al arqueomagnetismo, pues discute la estabilidad de la magnetización remanente en una vasija. Tres décadas después Folgerhaiter (1896, 1897a,b, 1899) describe el uso potencial del arqueomagnetismo como una herramienta para hacer dataciones, y dos décadas después, Folgerhaiter por un lado y por otro lado Mercanton (1907, 1918) realiza experimentos cuyo éxito se ve opacado por las deficiencias de los instrumentos utilizados en aquella época.

Uno de los principales objetivos del método arqueomagnético es la creación de curvas de variación secular para cada uno de los parámetros del campo geomagnético. La construcción y en particular, la configuración

de estas curvas, está ligada a cuestionamientos sobre la naturaleza del campo geomagnético junto con interrogantes importantes como las componentes dipolares y no dipolares, la deriva al oeste, el desplazamiento del polo del eje de rotación, etc. Es también gracias a esta dependencia temporal y regional de los parámetros geomagnéticos que, como describió Folgerhaite (1899), se puede ocupar como una herramienta de datación para materiales arqueológicos tanto de los parámetros direccionales como de la intensidad del campo geomagnético.

3.1. Método de Arqueointensidad

Hasta el momento, la única forma de extraer la información de la intensidad del campo geomagnético registrada como una remanencia magnética en un material, se fundamenta en la reproducción de la adquisición de un campo magnético conocido (en dirección y magnitud) sobre el mismo material.

La intensidad del campo magnético de la Tierra es fácil de medir en una forma directa, pero no en forma indirecta. Una de estas formas indirectas para medir el campo son las técnicas desarrolladas por Thellier (1959). Este método se basa en la medición de la termoremanencia magnética parcial (*TRMp*) cuyo origen se explica a través de la existencia de un espectro de temperaturas de bloqueo T_B y desbloqueo T_{DB} , entre la temperatura ambiente y la T_C de los granos y dominios magnéticos que integran los minerales ferromagnéticos del material a estudiar. A partir de este método se calcula la intensidad del campo geomagnético que permeó al material en el momento de su calentamiento, en particular, al momento de la cocción de la cerámica.

Cuando una *TRMp* es adquirida a una temperatura T_{DB} durante el calentamiento será eliminada a una T_B de enfriamiento, así se puede reemplazar la remanencia natural magnética del material analizado en un procedimiento a pasos en el laboratorio. La suposición de una única temperatura de desbloqueo y bloqueo, es viable cuando la mineralogía magnética presenta dominios sencillos (ver Sección 3.1.1).

El método de Koenigsberger-Thellier-Thellier (*KTT*) forma una familia de experimentos derivados de la forma original en la que el espécimen se calienta dos veces a una temperatura T_i inmersa en un campo magnético conocido (\mathbf{H}_{lab}), primero en una dirección \mathbf{H}_{lab} y luego en la dirección

contraria $-\mathbf{H}_{\text{lab}}$, para medir posteriormente a cada calentamiento la \mathbf{TRM}_p inducida en el espécimen, es decir, las \mathbf{TRM}_1 y \mathbf{TRM}_2 que portarán la información de la \mathbf{RNM} , la porción de la magnetización original grabada por el campo antiguo, y la \mathbf{TRM}_p , la magnetización inducida por el campo \mathbf{H}_{lab} en sus dos direcciones, como:

$$\begin{aligned}\mathbf{TRM}_i^1 &= \mathbf{RNM}_i + \mathbf{TRM}_{p_i}^{\mathbf{H}_{\text{lab}}} \\ \mathbf{TRM}_i^2 &= \mathbf{RNM}_i - \mathbf{TRM}_{p_i}^{-\mathbf{H}_{\text{lab}}}\end{aligned}\quad (3.1)$$

en donde el subíndice i denota la temperatura $T_{\text{ambiente}} < T_i < T_C$ a la cual fue calentado el espécimen.

Con el perfeccionamiento de los blindajes para campos magnéticos de baja frecuencia, como el de la Tierra, Coe (1967) propone solo un calentamiento con campo, con el fin de que las operaciones entre la \mathbf{TRM}_p y la \mathbf{RNM} no propaguen la incertidumbre en las mediciones realizadas en los dos calentamientos a la misma temperatura como sucede al obtener los valores de éstas remanencias magnéticas en el método de Thellier-Thellier original. A partir de esta modificación se obtienen dos variantes: el primer calentamiento con campo y el segundo sin campo (conocido como \mathbf{IZ} por sus siglas en inglés) o, el primero sin campo y el segundo con campo (\mathbf{ZI} por sus siglas en inglés).

Uno de los principales problemas de este tipo de experimentos se debe al calentamiento (y su efecto en la \mathbf{TRM} registrada en el material), lo que provoca transformaciones mineralógicas no deseadas que impiden la obtención de la información original del campo H_{ant} (ver sección 3.1.1). En este sentido se han implementado otros protocolos que reducen estas alteraciones. Entre ellos se encuentra el sugerido por Kono (1974) en el cual se calienta una sola vez el espécimen a cada T_i colocándolo de tal forma que $\mathbf{RNM} \parallel \mathbf{H}_{\text{lab}}$; este método lo describen a detalle Kono y Ueno (1977). Por otro lado, para controlar las alteraciones que puedan sufrir los minerales por oxidación durante su calentamiento rodeados de una atmósfera no reductora, se han propuesto procedimientos con variantes al método de \mathbf{KTT} en los que se controla la atmósfera dentro de la cámara del horno (Kissel y Laj, 2004; Taylor, 1979; Valet *et al.*, 1998). También se ha propuesto que las mediciones se realicen durante el calentamiento (Boyd, 1986), o calentar por medio de microondas la fase magnética portadora de la información (Walton, 1993).

De entre los diferentes métodos propuestos para obtener la intensidad de H_{ant} y que poseen un alto grado de éxito, tanto en materiales volcánicos como arqueológicos, el método de Thellier-Thellier sigue siendo el más

utilizado hasta la fecha en el campo del arqueomagnetismo, y en particular el modificado por Coe (1967), utilizado en este estudio. Debido a que las hipótesis del método son, en muchas ocasiones, difíciles de satisfacer independientemente del método que se utilice. Por lo que se han impuesto una serie de controles a la metodología, sin los cuales las mediciones obtenidas difícilmente son aceptadas como confiables (Biggin y Paterson, 2014; Kissel y Laj, 2004).

3.1.1. Leyes de Thellier y suposiciones del método

El método de Thellier se fundamenta en cinco propiedades de las **TRMp**, que aprovechan la descripción vectorial de la magnetización. La primer suposición está dada para algún campo que se registra en algún material. En ella se supone que la magnetización M_ν adquirida es linealmente proporcional a la dirección e intensidad de algún campo existente H_ν durante el calentamiento de dicho material; es decir:

$$M_\nu \simeq \alpha_\nu H_\nu \quad (3.2)$$

donde la constante α_ν está relacionada con las propiedades mineralógicas del material. La segunda y la quinta suposición están relacionadas directamente con el registro de la información direccional y de la intensidad del campo. La tercera y la cuarta concretan los resultados experimentales de la T_B en materiales que presentan DS.

Al considerar un conjunto de temperaturas ascendentes discretas $\{T_i\}$, $\forall_{i=1}^n$ que abarcan desde la temperatura ambiente hasta T_C , las propiedades son las siguientes:

1. $\|\mathbf{TRM}\| \propto \|\mathbf{H}\|$,
2. $\mathbf{TRMp} \parallel \mathbf{H}$,
3. $\mathbf{TRMp}(T_i, T_{j<i}, \mathbf{H}) = \mathbf{TRMp}(T_i, T_{j<i}, \mathbf{H} = 0)$ si $T < T_{j<i}$ y $\mathbf{TRMp}(T_i, T_{j<i}, \mathbf{H} = 0) = 0$ si $T > T_i$,
4. $\mathbf{TRMp}(T_i, T_{j<i}, \mathbf{H}) \cap \mathbf{TRMp}(T \notin (T_i, T_{j<i}), \mathbf{H}) = \emptyset$,
5. $\mathbf{TRM} = \sum_i \mathbf{TRMp}(T_i, T_{j<i}, \mathbf{H})$ tal que $\mathbf{TRMp}(T_i, T_{j<i}, \mathbf{H})$ es única.

La primera y la segunda propiedad ya eran conocidas antes de los experimentos de Thellier por Folgerhaiter (1899). Sin embargo, las últimas tres propiedades son el resultado de los experimentos realizados por Thellier (1941, 1946). Estas cinco propiedades son conocidas, en su forma reducida, como las tres leyes de Thellier. *Aditividad*: Cuando las $TRMp$ se producen debido al mismo campo \mathbf{H} , sus intensidades se suman. Esto es lo esperado debido a que el espectro de temperaturas de desbloqueo se puede descomponer en subconjuntos sin intersección, cada uno asociado con una $TRMp$. *Reciprocidad*: La $TRMp$ adquirida entre dos temperaturas $T_{j<i}$ y T_i durante un calentamiento en un campo \mathbf{H} , se puede desmagnetizar térmicamente sobre ese intervalo $(T_{j<i}, T_i)$ cuando $\mathbf{H} = 0$, i.e. las temperaturas de bloqueo y desbloqueo se consideran idénticas cuando el material es expuesto a un campo débil. *Independencia*: Las $TRMp$ adquiridas en intervalos de temperatura diferentes son mutuamente independientes en intensidad y dirección. Así, esta $TRMp$ desaparece cuando se consigue su intervalo de temperaturas de desbloqueo en un calentamiento.

A partir de estas leyes es posible encontrar una relación entre el campo registrado en las muestras (\mathbf{H}_{ANT}) y el campo (\mathbf{H}_{LAB}) que se imprime sobre las muestras durante el proceso de desmagnetización de Thellier-Thellier. Cuando estas leyes se cumplen bajo la condición de existencia de dominios sencillos en el material analizado, se pueden relacionar las magnitudes de las magnetizaciones medidas en el material con la intensidad de los campos por medio de

$$H_{ANT} = \frac{M_{ANT}}{M_{LAB}} H_{LAB} \quad (3.3)$$

donde M_{ANT} y M_{LAB} son las magnetizaciones medidas en el espécimen. Sin embargo se deben satisfacer tres condiciones para que esta ecuación sea válida. 1) por 3.2, $H_{ANT} \propto M_{ANT}$, lo cual se sabe que se cumple para campos de baja intensidad como el de la Tierra (Prop. 1 y 2). 2) cada intervalo de temperatura de la RMN debe ser remplazado por completo por una TRM , i.e. no debe haber una adición entre estas remanencias (Prop. 3, 4 y 5). Y la última y la más difícil de cumplir está asociada a la mineralogía portadora de la magnetización, y se expresa como: 3) los minerales deben mantenerse inalterados desde el primer calentamiento (el original) y después de cada uno de los calentamientos que se realicen durante la experimentación con el espécimen. El incumplimiento de este último lleva a resultados con grandes incertidumbres, siendo el origen principal de este problema el tamaño de grano y el tipo de dominio presente en el material.

Se considera entonces que la remanencia adquirida se presenta debido a un espectro de tamaños de grano y consecuentemente a un espectro de coercitividades. La verificación de la validez de estas tres leyes es difícil de probar en su totalidad previo al inicio del método. Sin embargo, antes de comenzar el proceso de arqueointensidad se deben llevar a cabo dos pruebas para conocer la estabilidad, tanto de los minerales durante los pasos de calentamiento-enfriamiento como de la señal magnética registrada en los mismos, esto con el objetivo de que la relación entre el esfuerzo de medición y el fracaso de los especímenes durante el proceso sea lo más pequeña posible. Para prevenir y corregir los resultados que puedan derivarse de estos problemas, existen trabajos en los cuales se han propuesto procedimientos simultáneos al método de Thellier (Sección 3.1.2). Como el descrito por Biggin y Perrin (2007), y comparado en Dunlop (2011) con otros procedimientos útiles para eliminar las componentes de MD presentes en el espécimen. Otro procedimiento muy usado para verificar la fiabilidad de los resultados de la intensidad calculada es la corrección por la velocidad de enfriamiento (Sección 4.4).

3.1.2. Método de Thellier modificado y gráfica de Arai

Dentro de la familia de experimentos KTT , el método de Thellier-Coe ($T - C$) se presenta como uno de los más adecuados para trabajar con cerámicas. A pesar de la falta de simetría en las ecuaciones 3.4 que describen la magnetización remanente natural y la adquirida durante los pasos de calentamiento-enfriamiento, el cálculo y los resultados de las intensidades obtenidas por este método son fiables (Coe, 1967). La diferencia de los términos entre las ecuaciones que describen el método $T - C$ (ec. 3.4) y las que describen el de TT original (ec. 3.1), se debe a que uno de los dos calentamientos en $T - C$ a T_i se hace dentro de un blindaje magnético; y el valor medido de la magnetización se considera como correspondiente **únicamente** a la remanencia magnética natural parcial (**RNMp**) adquirida a una temperatura $T < T_i$ dentro del campo antiguo.

$$\begin{aligned} \text{TRM}_i^1 &= \text{RNMp}_i \\ \text{TRM}_i^2 &= \text{RNMp}_i + \text{TRMp}_i^{H_{\text{lab}}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

donde ^{1,2} indican el orden de calentamiento (medición) a la temperatura i -ésima, y ^{H_{lab}} indica que la TRMp_i es adquirida durante el calentamiento con un campo de dirección e intensidad controlada en el laboratorio.

Este método, al igual que todos los métodos de paleointensidad, se ve fuertemente influenciado por la presencia de multidominios, y en particular, debido a que la adquisición de la **TRMp** en el laboratorio es distinta a la **TRMp*** adquirida naturalmente cuando está presente este tipo de dominio (Leonhardt *et al.*, 2004). Ésta última remanencia se adquiere en un intervalo de temperatura ($T_0, T_i < T_C$) cuando al material se le aplica un campo magnético durante su enfriamiento en este intervalo *después de haber sido calentado a su T_C* ; por otro lado, la adquirida en el laboratorio se da a partir de calentar y enfriar el material de temperatura ambiente T_0 a $T_i < T_C$ aplicando un campo magnético durante el enfriamiento (e.g. Dunlop y Ozdemir, 2000; Shcherbakov *et al.*, 1993; Shcherbakova *et al.*, 2000).

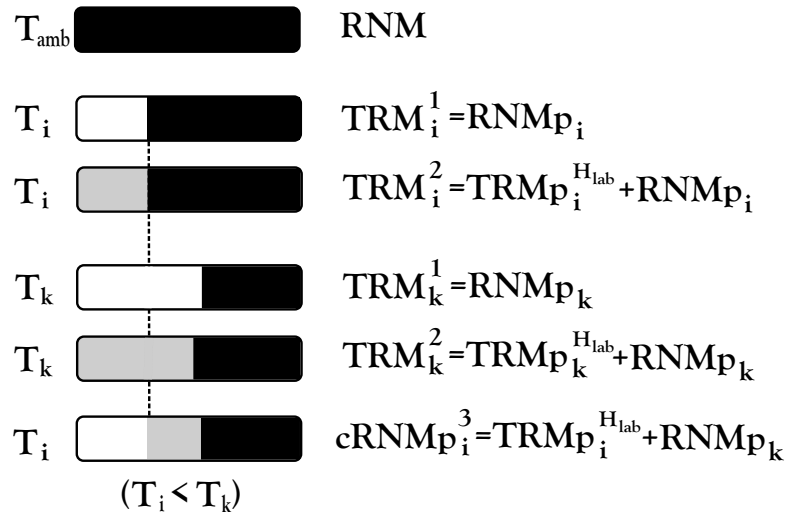


Figura 3.1: Esquema de los calentamientos - mediciones en el método de Thellier-Coe. ^{1,2,3} indican el orden de calentamiento-medición para las temperaturas *i* - esima y *k* - esima. La zona en negro es la remanencia natural magnética (RNM), la zona en gris es la termoremanencia magnética parcial (TRMp) adquirida durante el calentamiento con un campo H_{lab} y los espacios en blanco representan la desmagnetización del material. Modificado de Valet (2007)

En el método de $T - C$ se utilizan calentamientos de control en los que se mide una $TRMp$ dada a una temperatura $T_k < T_i$ donde T_i y T_k son temperaturas en el protocolo IZ o ZI del método $T - C$. Este paso de calentamiento en retroceso (denotado como $cRNMp$), verifica la ley de independencia a través de la comparación de esta remanencia

$RNMp$ –control con la $RMNp$ a la temperatura T_i (Figura 3.1). La relación temperatura vs magnetización de estos controles puede ser utilizada para corregir los datos que presenten alguna de las alteraciones mencionadas durante su análisis en las curvas RNM vs TRM introducidas por Arai (1963) (Valet *et al.*, 1998).

La representación gráfica de los resultados del método $T - C$ pueden ser visualizados de varias formas (Figura 3.2). Inicialmente Thellier (1959) presentó sus resultados en una gráfica de momento magnético contra temperatura llamada gráficas de Roquet. Sin embargo, la forma más usada son las gráficas de Arai (Nagata *et al.*, 1963) en las que se exponen las componentes parciales de la RNM contra las de la TRM . La gráfica de Arai representa, indirectamente, la linealidad entre los campos magnéticos H_{LAB} y H_{ANT} de la ecuación 3.3 cuya pendiente es la razón entre las magnetizaciones $m = \frac{M_{ANT}}{M_{LAB}}$. La linealidad de los datos experimentales cumple las leyes de Thellier, por lo que si la curva $RNM - TRM$ se ve deformada, alguna de estas leyes no se estará cumpliendo.

En este tipo de gráficas también es posible apreciar perturbaciones en la magnetización remanente debida a alteraciones mineralógicas, por ejemplo la concavidad hacia arriba de la curva que se sucede debido a que $T_{DB} < T_B$ (Dunlop y Ozdemir, 2000; Fabian, 2001), fenómeno provocado por la presencia de portadores MD de una parte de la remanencia magnética medida (ver Sección 2.1.2).

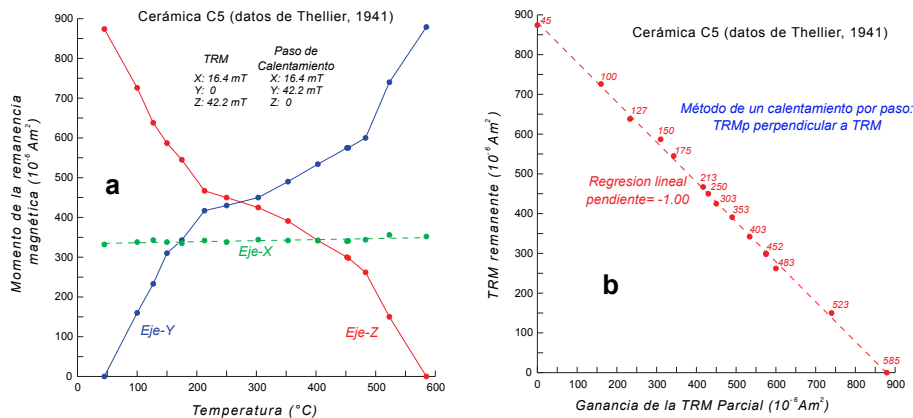


Figura 3.2: Dos tipos de representaciones de los resultados del método $T - C$. **a** Gráfica de Roquet (momento vs temperatura) y **b** Gráfica de Arai. Modificado de Dunlop (2011). Los datos son de Thellier (1941).

Es a partir del trabajo de Coe *et al.* (1978) que se establecen parámetros de confianza a los valores obtenidos del método $T - C$ representados en la gráfica de Arai. Estos valores estadísticos se sustentan en la elección del segmento en la gráfica de Arai, de donde se obtiene el valor de la intensidad del campo H_{ant} con la mayor confianza (ver *Apéndice* en Coe *et al.*, 1978, para mas detalles):

- f en el intervalo $[0,1]$, representa la fracción de la RNM utilizada en la sección de donde se obtiene la pendiente. $f = \Delta y_T / y_T$ donde y_T son los valores de la RNM .
- g en el intervalo $[0,1]$, es un factor que describe la brecha entre cada uno de los valores de las $RNMp$, i.e. describe la uniformidad de la separación de las $RNMp$ siendo $g \rightarrow 0$ cuando los valores tienen separaciones menos uniformes. $g = 1 - [(1/\Delta y_T) \sum_{i=1}^{N-1} \Delta y_i^2] / \Delta y_T$ para N puntos a lo largo del segmento donde se realiza el ajuste.
- q , el parámetro de calidad que relaciona los dos anteriores con la incertidumbre obtenida del ajuste lineal en el segmento analizado. $q = |b|fg/\sigma_b$ donde b es la pendiente en el ajuste de la recta y σ_b el error estándar de dicha pendiente.

Además de estos tres factores, Leonhardt *et al.* (2000) proponen un factor δ_{CK} para cuantificar el grado de alteración que sufre un espécimen durante los calentamientos del experimento. Siendo $\delta_{CK} = \max(\delta_{CK}(T_i)) = \max[(100 \times cRNMp(T_i) - RNMp(T_i)) / TRM_{ab}]$ donde TRM_{ab} es la intersección, de la recta ajustada, con el eje de las abscisas.

Otro factor mucho más usado en trabajos de paleo y arqueointensidad que describe los cambios magnetomineralógicos en cada uno de los pasos de calentamientos en el método. Este factor $DRAT$ (por sus siglas en ingles), es una diferencia entre el valor de la medición de la TRMp y el de la cTRMp, normalizada con respecto a la longitud del segmento en la gráfica de Arai seleccionado para hacer el ajuste (Selkin y Tauxe, 2000). Los valores límites para cada uno de estos parámetros se encuentran en la Sección 4.3 y fueron los usados para aceptar la determinación de la intensidad en el análisis de las gráficas de Arai. Estos valores se obtuvieron por medio del programa de Leonhardt *et al.* (2004) *TheilnerTool 4.22*.

3.2. Datación por arqueointensidad

Las curvas de VS son la principal herramienta para realizar las dataciones por arqueomagnetismo. Es necesario conocer las propiedades de la curva de VS a utilizar, ya sea que se usen los parámetros direccionales (declinación o inclinación) o la intensidad del campo geomagnético. Estas propiedades se centran principalmente en su extensión espacial dividiéndose en globales, regionales o locales. Además, se pueden distinguir por el tipo de materiales que se usaron para obtener los datos que componen cada una de las curvas. Por ejemplo, la curva ARCH3K.1 está compuesta por información obtenida a partir de materiales únicamente arqueológicos mientras que por ejemplo, la curva CALS3K.4 está compuesta por datos obtenidos de flujos de lava, materiales arqueológicos y sedimentos de lago (Figura 1.2).

El método para obtener una datación por arqueointensidad usando una curva de variación secular se basa en considerar dos funciones de densidad de probabilidad: una para el valor de la intensidad distribuida normalmente a un tiempo t fijo con media $G_D(t)$ ($N(G_D(t), \sigma_D^2)$) en todo el intervalo sobre el cual se desea hacer la datación (las medias de cada una de estas funciones para todo tiempo t son iguales y es justo la medición con su error estándar). Y una segunda para cada valor de intensidad en la CVS igualmente distribuida de forma normal sobre un tiempo t dado en el intervalo donde se desea hacer la datación ($N(\bar{G}_D(t), \sigma_G^2)$). La datación se da en una tercer densidad de probabilidad sobre el tiempo por medio la probabilidad condicionada entre D y \bar{G}_D como

$$PDF_D(t) = p(D | \bar{G}_D, t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(D | G_D, \bar{G}_D, t) \cdot (G_D | \bar{G}_D, t) \cdot dG_D \quad (3.5)$$

Las funciones de densidad de probabilidad son calculadas por medio de la metodología descrita por Lanos (2004), y en el caso del programa de MATLAB *archaeo_dating v6* realizado por Pavón-Carrasco *et al.* (2011), es posible calcular, independiente de las variables direccionales, un intervalo de fechas para todas las coincidencias de la intensidad del campo obtenido sobre la CVS. Estos intervalos de tiempo, según el método arqueomagnético son probables, sin embargo solo uno puede ser la edad correcta de la cerámica o material arqueológico. Por lo que es necesario tener un contexto arqueológico con el cual englobar el material analizado.

3.3. Arqueomagnetismo en México

Los estudios arqueomagnéticos en el territorio mexicano comienzan con el trabajo de Nagata *et al.* (1965), que analizan materiales cerámicos del sitio arqueológico de Cuiculco al sur de la Cd. de México, y que asocian con los emplazamientos flujos de lava y materiales prioclasticos provenientes del volcán Xitle. A partir de este trabajo se realizan mas investigaciones arqueomagnéticas por un lapso de dos décadas: Coe *et al.* (1967) estudian un fragmento de magnetita encontrado en San Lorenzo Tenochtitlan, Veracruz. Bucha *et al.* (1970) realizan determinaciones de arqueointensidad en cerámicas para sitios entre de Arizona y México. Wolfman (1973) publica una curva de variación secular con datos arqueomagnéticos obtenidos de sitios en México, Guatemala, Honduras y El Salvador. Carlson (1975) experimenta con el fragmento M-160 encontrado en San Lorenzo Tenochtitlan, Veracruz. y cuyos resultados arrojan una manufactura especializada. Análogamente Malmstrom (1976) reporta una roca en Izapa, Chiapas, con forma de cabeza de tortuga con la peculiaridad de ser magnética en la posición específica de la nariz. Y finalmente Urrutia *et al.* (1981, 1986) reportan edificios en sitios de Oaxaca, Tabasco, Yucatán, Quintana Roo y Estado de México cuya orientación coincide con la variación del norte magnético en los periodos asociados para esos sitios arqueológicos. Hubo una discontinuidad desde este último estudio hasta 2008 cuando se retomaron los estudios arqueomagnéticos en el sitio arqueológico de Quiahuitlan, Veracruz López-Téllez *et al.* (2008). A partir de éste estudio, y hasta la fecha, se han llevado análisis arqueomagnéticos tanto direccionales como de intensidad a partir de los cuales se ha iniciado la construcción de la curva de variación regional para México. Sin embargo, la mayoría de los datos fueron obtenidos por medio de materiales colectados principalmente en la zona centro del territorio mexicano, dentro de la zona de Mesoamérica. A pesar de que las curvas de variación secular se consideran válidas en un radio de 1000 *km* a partir del sitio de muestreo, aún falta cubrir gran parte de la zona norte de México.

Soler-Arechalde (2014) presenta una recopilación de las mediciones utilizadas para las curvas de variación secular (direccional y de intensidad, Figura 5.2). Hace notar que existen aún periodos que no están bien representados, ya sea por falta de datos o por una escasa densidad de éstos. En el caso de las curvas direccionales existen dos periodos: [300 100] aC y [1200 1500] dC que presentan una deficiencia en la densidad de datos. En el caso de la curva para la intensidad existen tres periodos que se aprecian

perfectamente en la Figura 5.2: [1200 300] aC, [100 aC 500 dC] y [1200 1300] dC. Es por eso que la búsqueda de materiales que sean viables para este tipo de estudio debe darse en estas temporalidades, además de ser necesario ampliar la obtención de materiales que cubran una mayor extensión del territorio.

Capítulo 4

Método de arqueointensidad y resultados

4.1. Selección y preparación de las muestras

Solo los tiestos que contenían pastas cerámicas homogéneas y finas fueron elegidos para ser tratados. A pesar de que la decoración con colores rojizos, cremas, antes y cafés están asociados a la presencia de minerales con alto contenido de Fe, la señal magnética de las muestras no se ve influenciada por ellos, por lo que el decorado no es determinante durante la selección de las cerámicas. Se aseguró la correspondencia con los periodos identificados por su tipología cerámica de los materiales arqueológicos analizados de los cuatro sitios arqueológicos, i.e. no se tienen tiestos pertenecientes a zonas de relleno o vagamente identificadas por su tipología cerámica. Esto cumple el doble propósito de asegurar la datación en una ventana de tiempo reducida y de proveer datos a la curva de variación secular, con dataciones por arqueointensidad y dataciones de ^{14}C asociadas a los tiestos estudiados.

El tamaño inicial del tiesto determina la cantidad de especímenes que se pueden obtener de él. De cada tiesto se obtuvieron entre siete y ocho pequeños fragmentos de entre 0.6 a 0.1 g, cortados con una sierra con disco de tungsteno para no contaminar las superficies de corte del fragmento (una descripción detallada se puede encontrar en Morales, 2008). Las dimensiones de los fragmentos obtenidos no exceden el volumen de un cubo de 7 mm de arista (Figura 4.1 b). En el corte se procuró evitar, en la medida de lo posible, el núcleo de reducción de la cerámica, este término hace referencia a

la parte central e interior de un tiesto, la cual queda comprendida entre las paredes del mismo (Heras y Martínez, 1992) y en la Figura 4.1 **a** se observa como la zona oscura del fragmento de tiesto. Esto se justifica al observar las gráficas κ vs T de las muestra AR106R (reducida) y AR106NR (no reducida) de la Figura A.3. La muestra no reducida presenta curvas no reversibles y por lo tanto no es apta para el estudio de arqueointensidad.

Debido a que no es posible realizar cortes circulares en la cerámica, se procuró realizar cortes para obtener cubos; sin embargo también se encapsularon fragmentos cortados con una geometría predominantemente plana y con esquinas angulosas. A partir de analizar la intensidad inicial de la RNM de cada espécimen, así como la estabilidad de la señal en función de la linealidad del diagrama de Zijderveld, se pudo determinar que la geometría del fragmento no perturba la información obtenida del material. Para finalizar la preparación, los fragmentos se colocan dentro de especímenes cilíndricos de $\approx 2.54 \times \approx 2.2$ cm de sal (Figura 4.1). Estos cilindros se forman usando sal pulverizada y comprimida en una prensa hidráulica. La sal no perturba la señal magnética medida del fragmento, debido a que es un material diamagnético. De este modo la señal magnética medida del cilindro (especimen) será la del fragmento de tiesto medible fácilmente dentro de la resolución del magnetómetro AGICO JR6.

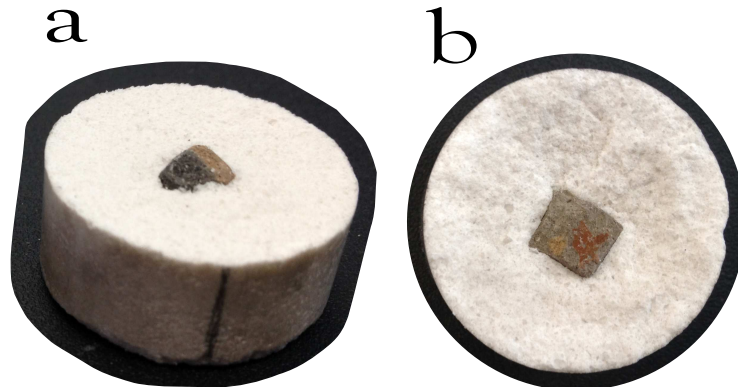


Figura 4.1: Dos especímenes (cilindros de sal) fracturados por la mitad en donde se observan los fragmentos de dos cerámicas encapsuladas en sal. **a** un espécimen donde no se pudo evitar el núcleo de reducción del tiesto. **b** fragmento cúbico de ≈ 0.63 cm de arista.

4.2. Validación preliminar de los materiales

Antes de comenzar el método de Thellier-Coe ($T - C$) se efectuaron dos experimentos usando muestras piloto de cada uno de los tiestos por analizar: 1) susceptibilidad en altas temperaturas (κ vs T , desde temperatura ambiente hasta $\approx 680^\circ C$) y 2) desmagnetización térmica. Estos dos procesos previos funcionan como filtros para poder aceptar la viabilidad de un tiesto y procesarlo con el método $T - C$.

- 1° Filtro: La curva completa κ vs T debe ser tal que la curva de calentamiento y enfriamiento sigan aproximadamente el mismo camino (se dice que la curva κ vs T es reversible)
- 2° Filtro: El comportamiento de los pilotos durante el proceso de desmagnetización térmica debe ser lineal en la componente primaria.

Para que un tiesto pueda ser analizado, debe cumplir con ambas características en dichos experimentos. Así, de estas pruebas fueron rechazados 7 de un total de 34 tiestos analizados en este estudio (Tablas 4.2, 4.4, 4.7 y 4.9), debido a que su curva de κ vs T no fue reversible (Figuras 4.3, 4.8, 4.13, 4.18) y/o de su diagrama de Zijderveld no se obtuvo una linealidad satisfactoria (la máxima desviación angular $< 17^\circ$ MAD por sus siglas en ingles). Tanto de las curvas de susceptibilidad a altas temperaturas como de los pilotos se obtuvo la T_C de cada tiesto pudiendo así, a partir de estas temperaturas, diseñar el tratamiento de arqueointensidad (Tabla 4.1).

Para poder descartar muestras a partir de las curvas de κ vs T , se calculó la diferencia entre la curva de calentamiento y enfriamiento por medio de la diferencia porcentual del área bajo cada una de las curvas ($D_{\kappa T}$). La diferencia porcentual entre sus áreas comparadas con respecto a la curva con el valor del área mayor nos dice qué tan cercanas están estas dos curvas en todo el espectro de temperaturas en donde se midió la susceptibilidad magnética (Figura 4.2 **a** y **b**). La evaluación de éste tipo de curvas por medio de éste factor ya es usado por Böhnelt *et al.* (2002) para distinguir su irreversibilidad. A partir del calculo de $D_{\kappa T}$, cualquier tiesto con un valor $< 0.4\%$ se elige para ser analizado. Este valor máximo se eligió luego de observar el comportamiento de todas las curvas analizadas, distinguiendo que, las no reversibles, están por arriba de este valor. Sin embargo, el uso del valor de $D_{\kappa T}$ como una referencia numérica para determinar la reversibilidad de las curvas es aún insuficiente. Por lo tanto, se utilizó también la gráfica de

la diferencia de las integrales numéricas de cada curva como una referencia cualitativa, observando la “suavidad” de la curva y su “cercanía” a una recta constante igual a cero (eje x), como una evaluación final del experimento de susceptibilidad contra temperatura (Figura 4.2 c).

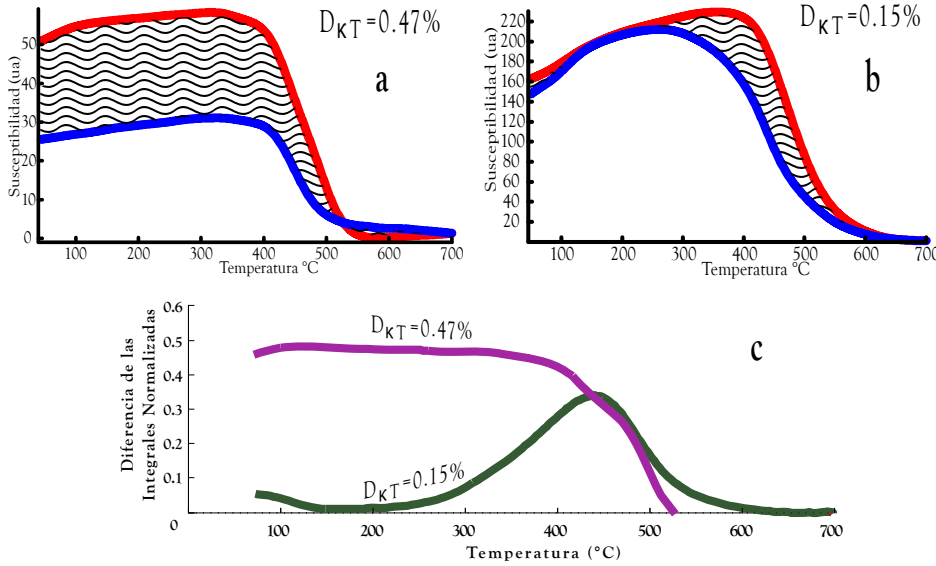


Figura 4.2: $D_{\kappa T}$ es el valor del área entre las curvas de calentamiento y enfriamiento (área rayada) en **a** y **b**. **a** curvas de κ vs T no aceptada por su alto valor $D_{\kappa T}$. **b** curva aceptada con un valor $D_{\kappa T}$ bajo. **c** gráficas de la diferencia entre las integrales numéricas normalizadas de ambas muestras. Se aprecia que la curva con $D_{\kappa T} = 0.15\%$ es mas suave y cercana a una recta constante igual a cero (eje x) en comparación de la curva con $D_{\kappa T} = 0.47\%$.

Las curvas de κ vs T se realizaron en tres equipos distintos, distinguiendo coincidencias cualitativas entre mediciones de la misma muestra para la elección de las muestras viables. Los equipos utilizados fueron: un sistema para medir susceptibilidad en altas temperaturas MS2 Bartington en el Instituto de Geofísica de la UNAM, un Kappabridges MFK1-FA con el horno CS4 de AGICO y una balanza avanzada de campo translacional variable (o balanza de Curie) AVFTB Magnetic Measurements en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California Norte. Son relevantes las diferencias en el funcionamiento de los sensores y la disposición de la muestra dentro del equipo de los tres aparatos. En el equipo Bartington la muestra se coloca en un tubo de ensayo abierto a la atmósfera, mientras que la medición se realiza durante el calentamiento de

la muestra. En el equipo AGICO la muestra es calentada fuera del sensor de susceptibilidad en un portamuestras sellado, impidiendo la salida de cualquier gas producido por la muestra; mientras que cuando se realiza la medición, el portamuestras es introducido en el sensor. Sin embargo, la principal diferencia entre las curvas producidas por los tres equipos proviene de la frecuencia de operación de cada sensor: el equipo Bartington trabaja con una frecuencia de 696 Hz, el equipo de AGICO con una frecuencia de 976 Hz y la balanza de Curie MM con una frecuencia en el calentamiento de 1.6 kHz y de enfriamiento de 1.3 kHz. Esta alta frecuencia provoca campos de intensidad media ($O(100mT)$) la cual no coincide por completo con la intensidad del campo geomagnético. Sin embargo al utilizar el parámetro $D_{\kappa T}$ se engloba el comportamiento general de la mineralogía en la cerámica. Es por ello que para ciertos especímenes se ocupó la curva termomagnética en lugar de la curva κ vs T , teniendo cuidado al considerar las T_C (Fig. 2.3) obtenidas por el método de Moskowitz (1981) para las curvas termomagnéticas; mientras que para las curvas κ vs T se utilizó el método de Tauxe (1998).

Las gráficas de κ vs T también tienen la finalidad de identificar la principal fase de minerales ferrimagnéticos. La identificación de estos minerales presentes en las cerámicas a partir de las gráficas κ vs T , se fundamenta en la presencia de las T_C identificadas en la gráfica como abruptas disminuciones en la susceptibilidad a modo de escalones. Estas T_C son únicas para los minerales ferrimagnéticos cuando se considera su variación de composición y contaminación con otros elementos.

El segundo experimento realizado a las muestras para poder elegir las cerámicas más viables, fue un proceso de desmagnetización térmica de especímenes piloto, para conocer el comportamiento de la dirección registrada en las componentes mineralógicas magnéticas. Este proceso se llevó a cabo con la mitad de las temperaturas mostradas en la Tabla 4.1, siendo los intervalos de desmagnetización mucho más largos que los elegidos para el proceso de obtención de la intensidad. El equipo que se ocupó, tanto en este experimento como durante todo el proceso de $T-C$, fue un horno MMTD24 de Magnetic Measurements y un magnetómetro de giro JR6 de AGICO. A partir de esta prueba y de la anterior se descartaron el 24% de la totalidad de las muestras analizadas en las pruebas, debido a que no presentaron una linealidad satisfactoria en el diagrama de Zijderveld.

Grupo 1

Med. \ Cal.	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}
RNM y TRMp	100	200	260	310	340	380	420	450	480	510	525
cRNMp							↓ 310	↓ 380	↓ 420		↓ 480

Grupo 2

Med. \ Cal.	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{12}	T_{14}
RNM y TRMp	70	130	180	230	280	310	340	370	400	430	460	490	520	550
cRNMp								↓ 310	↓ 340	↓ 370	↓ 400	↓ 430	↓ 460	↓ 490

Tabla 4.1: Esquema de temperaturas para el Método de Thellier-Coe. Donde RNM es la magnetización medida tras un calentamiento sin campo, TRMp es la magnetización medida tras un calentamiento con campo y cRNMp es la magnetización medida tras un calentamiento de control (ver Sección 3.1.2). El grupo 1 corresponde a las muestras AR94, 97, 99, 101, 104 y 106. El grupo 2 corresponde a las muestras AR89, 90, 91, 92, 93, 96, 98, 100, 103, 105, 107, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 1184, 1193, 1203, 1205, 1216 y 1225.

4.3. Caracterización de la arqueointensidad

Para obtener la intensidad del campo geomagnético registrado en las cerámicas se utilizó el método de $T - C$. Se usó un horno MMTD24 (con una deriva térmica de $\approx 7^\circ C$ por arriba de la temperatura programada) y una fuente de corriente BK Precision 1735A para aplicar el campo. La intensidad del campo aplicado para que las muestras adquirieran la termoremanencia magnética parcial ($TRMp$) fue de $40\mu T$. El esquema de calentamientos progresivos se muestra en la Tabla 4.1 junto con los calentamientos de control. Posterior a cada calentamiento y previo a cada medición en el magnetómetro, cada espécimen se desmagnetizaba por campo alterno a $5mT$ (Biggin y Perrin, 2007; Dunlop, 2011) con el fin de discriminar la señal portadora en las partículas MD. Se llevó a cabo un control de la magnetización antes y después de la aplicación de este campo en las muestras AR94, 97, 99, 101, 104 y 106 para analizar el comportamiento de este método en cerámicas, debido a que Biggin y Perrin (2007) y Dunlop *et al.* (2005) realizaron sus experimentos en materiales diferentes a los de la cerámicas arqueológicas.

Se consideraron los siguientes criterios para aceptar los valores obtenidos para la intensidad:

- No deben existir desviaciones significativas de la linealidad alrededor de la componente principal en el diagrama de Zijderveld (Zijderveld, 1967) durante el proceso de desmagnetización en el método de $T - C$.
- La componente sobre la cual se hace el ajuste en la gráfica de Arai corresponde a la componente característica en el diagrama de Zijderveld.
- El ajuste de la recta sobre la gráfica de Arai debe ser para $N \geq 5$ puntos.
- La fracción de la RMN (f en Coe *et al.* (1978)) $\geq 30\%$.
- El factor de calidad (q en Coe *et al.* (1978)) ≥ 3 .
- Se considera $\delta(CK)$ (Leonhardt *et al.*, 2000) con un máximo de 10% y un $DRAT \leq 15\%$.

A partir de considerar el modelo del GAD (Capítulo 1) se puede dar una asociación de la intensidad del CGM por medio del momento dipolar virtual MDV . Este valor está en función de la intensidad del CGM medido para un sitio sobre la superficie

$$MDV = \frac{4\pi r^3}{\mu_0} B_{ant} (1 + 3\cos^2(\theta))^{-\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

donde r es el radio de la tierra, B_{ant} la intensidad del campo magnético antiguo registrado en el material y μ_0 la permeabilidad magnética en el vacío. Cuando no se cuenta con el vector completo del CGM medido en la muestra (i.e. la dirección e intensidad del campo), θ es la colatitud del sitio y la ecuación 4.1 se le conoce como el *momento dipolar virtual axial (MDVA)*.

Finalmente se da relevancia a los valores de intensidad por medio del valor $\chi_{af}\%$, pues con este valor se comprender mejor la composición mineralógica de las muestras. Se realizaron mediciones de susceptibilidad con un sensor tipo MS2B de doble frecuencia marca Bartington en el Instituto de Geofísica de la UNAM. Las frecuencias utilizadas por este equipo, para medir la susceptibilidad a baja frecuencia (χ_{bf}) y a alta frecuencia (χ_{af}), son de 0.465

y 4.65 kHz respectivamente y a partir de las cuales se calcula χ_{df} % por medio de

$$\chi_{df} \% = \frac{\chi_{bf} - \chi_{af}}{\chi_{bf}} \times 100 \quad (4.2)$$

4.4. Corrección por rapidez de enfriamiento

Al momento de fabricar una cerámica, ésta se deja enfriar dentro del horno donde se realizó la cocción. El tiempo que permaneció la cerámica dentro de este horno, es mayor al tiempo que tarda en enfriarse el espécimen de dicha cerámica, durante su estudio en el laboratorio. Esta diferencia de tiempos se manifiesta en una señal magnética con mayor intensidad para tiempos de enfriamiento largos (durante su cocción) y menor intensidad para tiempos de enfriamientos cortos (durante el proceso del método de $T - C$) (Fox y Aitken, 1980; McClelland-Brow, 1984; Walton, 1980).

Este experimento se realiza para conocer la corrección por la rapidez de enfriamiento. El experimento se llevó a cabo siguiendo el método propuesto Chauvin *et al.* (2000) y modificado por Morales y Goguitchaichvili (2009). En el primer paso se calienta la muestra con campo y se enfría rápidamente, para posteriormente medir la TRM_1 . En el segundo paso se calienta de nuevo la muestra con campo y se enfría lentamente, volviendo a medir la magnetización de la muestra TRM_2 . El tercer paso es idéntico al primero y se obtiene una tercer magnetización TRM_3 . El enfriamiento rápido se llevo a cabo un horno MMTD24 con su propio ventilador, mientras que el enfriamiento lento se produjo sin el soporte del ventilador. El intervalo de temperaturas en estos ciclos de calentamiento-enfriamiento, fue de entre 550, 520 o 490°C (dependiendo de la muestra) a 200°C. El factor de corrección por rapidez de enfriamiento

$$f_{RE} = \frac{TRM_1}{TRM_2} = \frac{H}{H_{RE}} \quad (4.3)$$

se aplica sobre la arqueointensidad obtenida del método $T - C$ (ecuación 3.3). Por otro lado, de estas tres mediciones también se obtienen además los

cocientes

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{TRM_2 - TRM_1}{TRM_1} \\ r_2 &= \frac{TRM_1 - TRM_3}{TRM_1} \end{aligned} \quad (4.4)$$

donde r_1 provee de información acerca de la relevancia de la rapidez de enfriamiento en el tiesto y r_2 da información acerca de la incapacidad de un tiesto para adquirir una TRM luego de su recalentamiento. Estos dos cocientes se comparan en una gráfica con la función identidad para conocer que tan relevante es r_1 o r_2 , en el conjunto de los especímenes analizados.

4.5. San Gregorio

4.5.1. Contexto arqueológico

El sitio de San Gregorio Atlapulco en Xochimilco (que se denotará como SG) fue reportado por primera vez por Parsons *et al.* (1982) quienes comenzaron su descripción, identificando entre otras cosas una ocupación a finales del periodo Azteca (≈ 1300 dC) que se continúa hasta principios de la Colonia (1521 dC). En 1990 este sitio fue objeto de un rescate arqueológico dirigido por Raúl Ávila López (Lopez, 1995) identificando ocupaciones de entre 2500 y 2000 a.C. Sin embargo McClung de Tapia y Acosta Ochoa (2015) encuentran asentamientos entre 4200 y 4000 a.C. Las cerámicas provienen de la unidad B en Acosta Ochoa *et al.* (2014) y por su tipología están catalogadas como Blanco Xochimilco, Rojo Texcoco y Azteca III/IV, ésta última con la mayor presencia en todo el sitio y que determina las ocupaciones relacionadas a estas cerámicas en el Posclásico Tardío (1350 a 1519 dC) e inicios de la Colonia (1521 dC).

4.5.2. Resultados

Las muestras de este sitio corresponden únicamente a cerámicas. Se analizaron y obtuvieron las intensidades de 7 tiestos, cuya caracterización mineralógica se encuentra resumida en la Tabla 4.2, donde se incluye también los resultados obtenidos de las curvas κ vs T y termomagnéticas.

Todas las curvas κ vs T en este sitio se presentaron reversibles a toda temperatura durante este experimento ($T_{amb}, \sim 600^\circ C$). Además solo

aparecen de una a dos componentes magnetomineralógicas, apreciables a través del cálculo de la T_C por el método de Tauxe (1998). Todas las curvas de las muestras de este sitio tienen la morfología que se ejemplifica en la Figura 4.3.

A partir de la prueba de pilotos, se encontró que las muestras de este sitio (AR117, AR1184, AR1193, AR1203, AR1205 y AR1216) son apropiadas, salvo por la muestra AR1225, no obstante se efectuó su análisis de arqueointensidad.

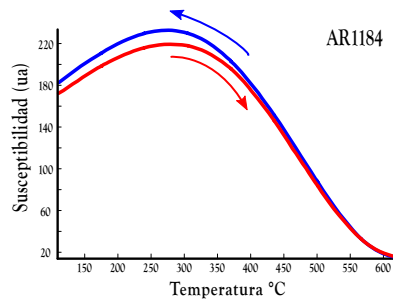


Figura 4.3: Ejemplo de curva $\kappa vs T$ para el sitio *SG*. La totalidad de las curvas de susceptibilidad a altas temperaturas fueron reversibles y con máximo dos componentes mineralógicas observadas en este tipo de experimentos.

Muestra	Descripción cerámica	$D_{\kappa T}$ (%)	T_C (°C)	$\overline{\chi_{df}}$ %	Mineralogía
AR117	Cazuela	0.04	515	34.88	TiMag pobre en Ti
AR1184 ¹	s/d	0.02	465	12.52	TiMag pobre en Ti
AR1193 ²	s/d	0.09	530	9.46	TiMag pobre en Ti
AR1203 ¹	Comal	0.15	511	13.56	TiMag pobre en Ti
AR1205 ¹	Comal	0.07	457	21.81	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR1216 ¹	Cuerpo	0.14	519	2.98	TiMag pobre en Ti
AR1225 ²	Cajete	0.36	531	17.96	TiMag pobre en Ti

Tabla 4.2: Relación de las muestras analizadas con tu tipología cerámica. $D_{\kappa T}$ es la diferencia porcentual entre las integrales de cada curva $\kappa vs T$ y la T_C general de la muestra para el calentamiento. ¹ el valor de la T_C se obtuvo a partir del método de la segunda derivada y ² el valor de la T_C fue obtenido a partir del método de Moskowitz (1981).

De los ciclos de histéresis se obtuvieron los parámetros para poder construir la gráfica de Day. En la Figura 4.4 se presentan dichos datos y la identificación de las regiones de DS, DPS y MD (Dunlop, 2002b).

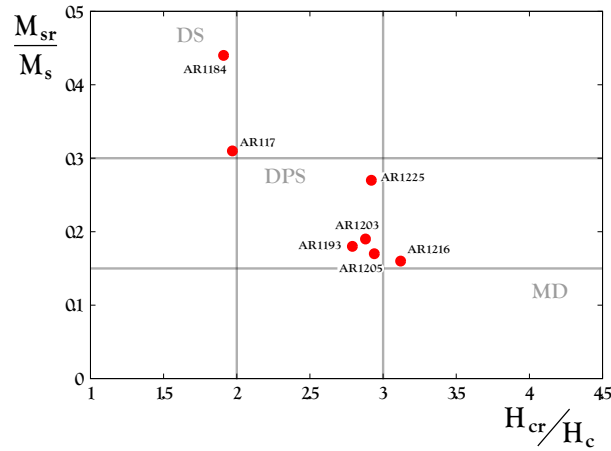


Figura 4.4: Gráfica de Day para las cerámicas del sitio *SG*. Se utilizan los valores límites de Dunlop (2002b) para definir los dominios.

A partir del método de arqueointensidad se obtuvieron valores de intensidad para las cerámicas aceptadas (Tabla 4.2). De los 7 tiestos analizados, solo de uno se obtuvo una datación dentro de la ventana arqueológica correspondiente al periodo Azteca y Colonial (1300 a 1521 dC). Los resultados se muestran en la Tabla 4.3 donde se presentan solo las medias del campo corregido para cada cerámica y las dataciones asociadas usando el modelo de variación secular SCHA.DIF.14K.

Muestra	$H_{RE}(\mu T)$	Periodo	Datación por SCHA.DIF.14K (años dC)
AR117*	27.7 ± 1.8	AztecaIII/IV	-
AR117	30.8 ± 2.4	AztecaIII/IV	-
AR1184*	41.8 ± 1.5	Blanco Xochimilco	[1579 1738]
AR1184	43.5 ± 1.4	Blanco Xochimilco	-
AR1193	38.2 ± 1.2	Rojo Texcoco	-
AR1203	50.2 ± 0.4	AztecaIII/IV	[1267 1555]
AR1205	24.4 ± 1.7	AztecaIII/IV	-
AR1216	35.1 ± 2.2	AztecaIII/IV	-
AR1225	40.2 ± 0.9	AztecaIII/IV	-

Tabla 4.3: Relación de muestras analizadas con su fase arqueológica. H_{RE} intensidad corregida por rapidez de enfriamiento del campo H_{ANT} con su incertidumbre. * son las muestras que cumplieron con todos los criterios de la sección 4.3 (ver Apéndice A). Las dataciones resaltadas son las aceptadas por su correspondencia con el contexto arqueológico. Las dataciones se llevaron a cabo dentro de una ventana de tiempo de 1200 dC a 1800 dC.

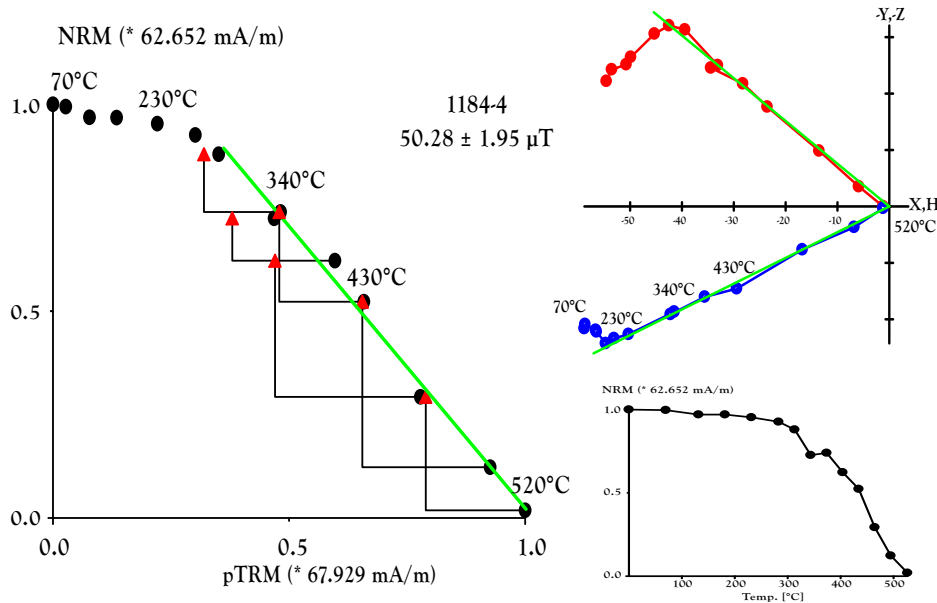


Figura 4.5: Gráfica de Arai, diagrama de Zijderveld y espectro de desmagnetización que ejemplifica el comportamiento de la muestra AR1184 perteneciente al sitio *SG*.

4.5.3. Discusión

A partir de las curvas de κ vs T se considera que todas las cerámicas son aptas para realizar el método de arqueointensidad debido a que presentan una reversibilidad casi total (ver parámetro $D_{\kappa T}$ en Tabla 4.2). Solo la muestra AR1225 no es totalmente reversible entre la temperatura ambiente y alrededor de los 300°C . Todas las cerámicas de este sitio poseen a lo más, dos fases magneto-mineralógicas distintas en función del espectro de temperaturas indicadoras de cambios mineralógicos. La diferencia entre las curvas κ vs T de calentamiento y enfriamiento (Figura 4.3) particulariza las T_C de los minerales antes y después del calentamiento de la muestra. La distinción de estos valores, $T_{C_{cal}}$ para la curva del calentamiento y la $T_{C_{enf}}$ para la curva del enfriamiento, puede usarse para verificar la estabilidad mineralógica. La desviación estándar de la diferencia entre estas temperaturas es $\pm 44^{\circ}\text{C}$, lo que indica también la estabilidad mineralógica de todas las muestras analizadas. Esto se corrobora con lo observado en la Figura 4.6 ya que, para la mayoría de los especímenes, las transformaciones mineralógicas no juegan un papel importante durante los calentamientos y,

por lo tanto, el factor dominante es r_1 (ver Sección 4.4).

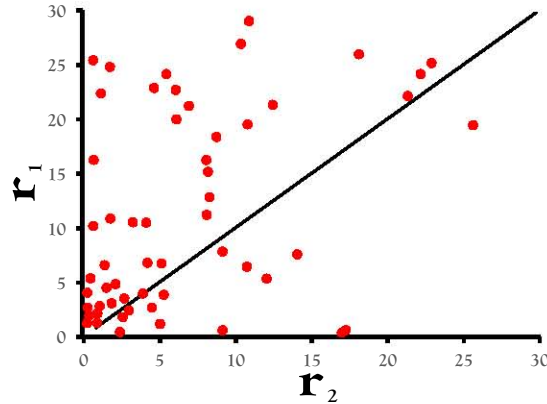


Figura 4.6: Relación entre los factores r_1 y r_2 para las muestras del sitio *SG*.

Las muestras AR1203 y AR1205 pertenecen a la misma pieza siendo partes de un mismo comal. Estas muestras se distinguen debido a que la muestra AR1203 pertenece a un borde y la muestra AR1205 pertenece al cuerpo. Considerando que en un comal puede haber un gradiente de temperatura radial, se conjeturó acerca de las componentes que pueda presentar cada uno de estos tiestos y su viabilidad para el método de $T - C$. Durante la prueba de pilotos se encontró que la muestra AR1205 posee dos componentes en su diagrama de Zijderveld, una secundaria en el intervalo de temperaturas ($T_{amb}, 400^\circ C$) y una primaria entre 400 y $560^\circ C$; no estando presente este comportamiento multicomponente en la muestra AR1203 (Figura 5.1). Es posible establecer que la muestra AR1205 contiene una segunda componente bien definida por debajo de los $280^\circ C$. La discusión general de estas muestras junto con dos del sitio LJ que presentan el mismo fenómeno se expone en el Capítulo 5.

Considerando la gráfica de Day para las muestras de este sitio (Figura 4.4), es posible identificar la existencia de DS en las muestras AR117 y 1184 y PDS en todas las demás, sin embargo los valores para δ_{CK} y DRAT de la mayoría de los especímenes de las muestras de este sitio, no cumplen los criterios establecidos. Por lo que es a partir de estas cerámicas que se decide hacer la determinación de las intensidades considerando solo los parámetros de Coe (1967) (H) y una segunda determinación considerando todos los criterios expuestos en la Sección 4.3 (H^*) (ver Tablas A.1 - A.4)

La muestra AR1184 también presenta dos componentes en el diagrama

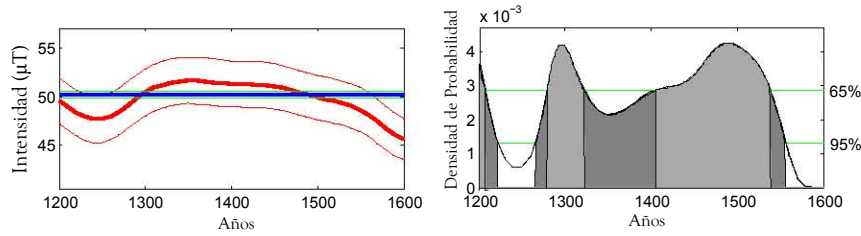


Figura 4.7: Se grafican la curva de variación secular con la intensidad de la muestras AR1203 y la densidad de probabilidad para su datación en una ventana de tiempo entre 1200 a 1600 aC. El nivel de referencia para una coincidencia del 95 % es de 1×10^{-4} y para el 65 % es de 2×10^{-3} .

de Zijderveld: una secundaria (con un intervalo de temperaturas entre T_{amb} y $300^{\circ}C$) y una primaria (entre 340 y $520^{\circ}C$) como se observa en el diagrama de Zijderveld de la Figura 4.5. Esta temperatura coincide con el cambio de componentes registrado en la muestra AR1205 (Figura 5.1), lo que sugiere un recalentamiento de la pieza y por lo tanto, la identificación de su uso para la preparación de alimentos o un uso ceremonial que involucre fuego. Además se identificó la temperatura aproximada para las fuentes de calor alrededor de los $300^{\circ}C$ dada por la inflexión en el diagrama de Zijderveld de la muestra AR1184.

Las intensidades coinciden con una región en la curva de VS que es casi constante. Es por ello que la ventana de tiempo se eligió entre 1200 dC a 1800 dC, siendo este un periodo mucho mas grande que el representado por la tipología cerámica. En la Figura 4.7 es posible distinguir dos edades a 1σ , en comparación de cuando se considera 2σ , que presenta una sola edad.

4.6. Tulyehualco

4.6.1. Contexto arqueológico

Este sitio (que se denotara como *Tul*) está localizado dentro de un predio al sur de la Ciudad de México en la Delegación Xochimilco en el poblado de Santiago de Tulyehualco y su excavación fue realizada como parte de un proyecto de salvamento arqueológico. El asentamiento se encontraba en una región que por periodos se anegaba. Montero G. (2016) reporta una gran variedad de materiales en el sitio que abarcan desde periodos prehispánicos, coloniales y modernos. Es a partir de las evidencias cerámicas que determina

el contexto de ocupación para las fases de Ayotla, Nevada y Manantial, entre 2200 y 800 aC. Montero G. (2016) establece 20 tipos cerámicos para estas fases presentando una filiación olmecoides como los son Tortuga Pulido y Pili Blanco entre otros (Niederberger, 1976). La datación que reporta Montero G. (2016), realizada en el Laboratorio de Radiocarbono de la UNAM, con una edad de [1421 1046] aC (González Hernández y Beramendi O., 2016) fue realizada a partir de carbón recolectado de un fogón ubicado en la superficie de una troncocónica.

4.6.2. Resultados

Al igual que en el sitio de San Gregorio, las muestras analizadas para este sitio fueron cerámicas en su totalidad. De las cerámicas correspondientes a este sitio, 2 corresponden a la fase Nevada, 5 a la fase Ayotla y 3 a la fase Manantial. De éstas, se analizaron 5 tiestos y solo de 4 se obtuvieron dataciones dentro de la ventana arqueológica que abarca las tres fases y con coincidencia con las dataciones de ^{14}C reportadas por Montero G. (2016). La Tabla 4.4 indica la relación de las muestras con su parámetro $D_{\kappa T}$ y T_C obtenidos de las curvas de κ vs T y termomagnéticas. De las cuales AR107 - 108 están representadas en la fase Nevada [1350 1250] aC, AR109 - 113 en la fase Ayotla [1250 1000] aC y AR114 - 116 en la fase Manantial [1000 800] aC caracterizadas por medio de la tipología cerámica según Niederberger (1976).

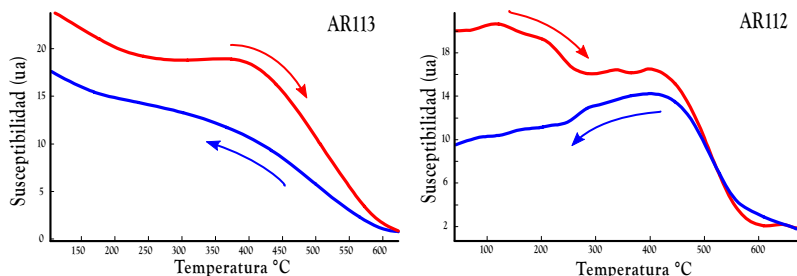


Figura 4.8: Ejemplo de curvas κ vs T para el sitio *Tul*. La totalidad de las muestras en este sitio se consideran aceptablemente reversibles, a excepción de la muestra AR112 que presentó el fenómeno de *pinza*, por lo que es reversible solo por arriba de los $400^{\circ}C$.

Muestra	Tipo cerámico	$D_{\kappa T}$	T_C	$\overline{\chi_{df}}$ %	Mineralogía
AR107 ²	Ventana rojo/bayo	0.29	556	5.81	TiMag pobre en Ti
AR108 ³	Lago rojo fino	-	-	-	s/d
AR109 ²³	Valle borde negativo	0.09	537	-	TiMag pobre en Ti
AR110 ²³	Tortuga pulida	0.09	537	-	TiMag pobre en Ti+rica en Ti
AR111 ³	Olla acanalada /Tulyehualco acanalado	-	-	-	s/d
AR112 ¹	Pilli rojo/bayo	0.26	509	3.40	TiMag pobre en Ti+rica en Ti
AR113 ¹	Pilli blanco	0.39	513	40.41	TiMag pobre en Ti+rica en Ti
AR114 ²	Ixta blanco	0.21	542	7.75	TiMag pobre en Ti
AR115 ²	Isla Negativo	0.14	553	7.24	TiMag pobre en Ti
AR116 ¹³	Pilli rojo/bayo claro	0.4	485	6.98	TiMag pobre en Ti ??

Tabla 4.4: Relación de las muestras analizadas con su tipología cerámica. $D_{\kappa T}$ es la diferencia porcentual entre las integrales de cada curva κ vs T y la T_C general de la muestra para el calentamiento. ¹ el valor de la T_C se obtuvo a partir del método de la segunda derivada y ² el valor de la T_C fue obtenido a partir del método de Moskowitz (1981), ³ son las muestras rechazadas debido a que no fueron reversibles y/o la desmagnetización térmica de sus pilotos no fue satisfactoria (ver Sección 4.1)

De los ciclos de histéresis se obtuvieron los parámetros para poder construir la gráfica de Day. En la Figura 4.9 se presentan dichos resultados.

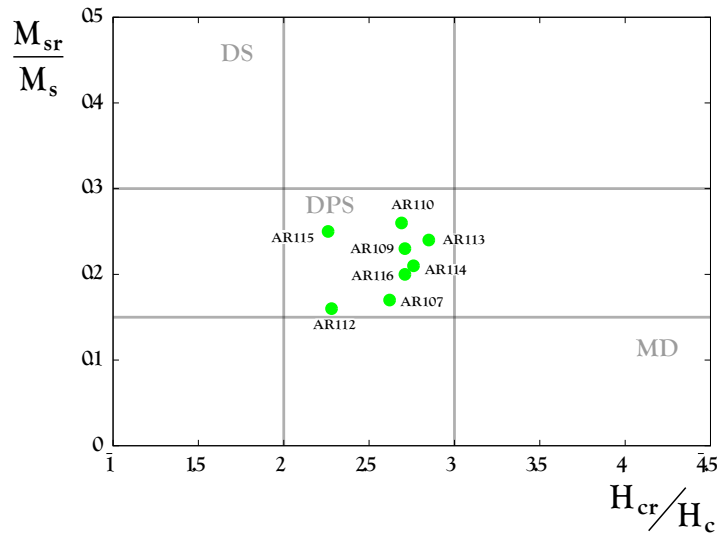


Figura 4.9: Gráfica de Day para las cerámicas del sitio de Tulyehualco. Se utilizan los valores límites de Dunlop (2002b) para definir los dominios.

A partir del método de arqueointensidad se obtuvieron valores para las

cerámicas aceptadas (Tabla 4.4). Los resultados se muestran en la Tabla 4.5 donde se presentan sólo las medias del campo corregido para cada cerámica.

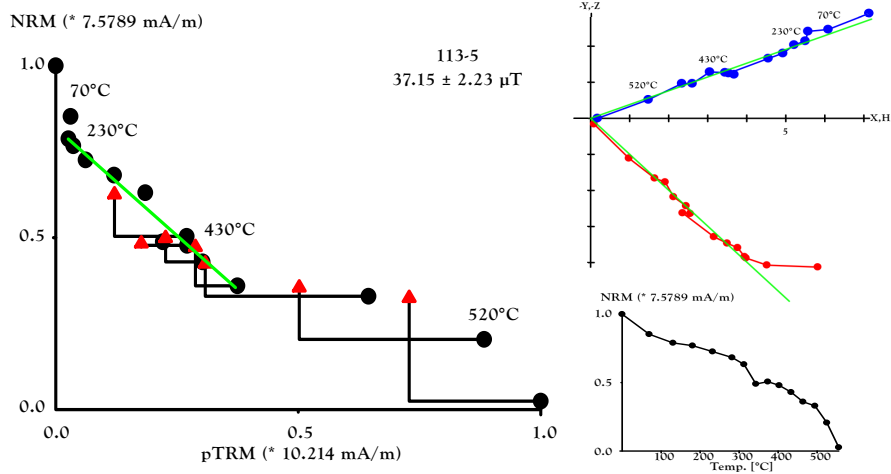


Figura 4.10: Gráfica de Arai, diagrama de Zijderveld y espectro de desmagnetización que ejemplifica el comportamiento de la muestra AR113 perteneciente al sitio *Tul*.

Muestra	$H_{RE}(\mu T)$	Periodo	Datación arqueointensidad (años aC)	Coincidencia con datación por ^{14}C (%)
AR107*	35.5 ± 1.5	Nevada	[1065 881]	5
AR107	35.7 ± 0.1	Nevada	[1063 1018]	5
AR112	34.9 ± 1.3	Ayotla	[1061 888]	4
AR113*	38 ± 1.4	Ayotla	[1093 1024]	13
AR113	38.4 ± 0.9	Ayotla	[1088 1035]	11
AR114*	12.9 ± 0.05	Manantial	-	-
AR114	11.9 ± 0.5	Manantial	-	-
AR115*	36.9 ± 1.3	Manantial	[1078 1019]	9
AR115	40.4 ± 2.8	Manantial	[1259 1033]	57

Tabla 4.5: Relación de muestras analizadas con su fase arqueológica según Niederberger (1976). H_{RE} intensidad corregida por rapidez de enfriamiento del campo H_{ANT} con su incertidumbre. * son las muestras que cumplieron con todos los criterios de la sección 4.3 (ver Apéndice A). Las dataciones resaltadas son las aceptadas por su correspondencia con el contexto arqueológico o cuyos valores se consideran en coincidencia con el modelo de la curva de variación secular SCHA.DIF.14K.

Muestra	Datación por arqueointensidad (aC)	Edades más probables según coincidencia con tipología cerámica (aC)	Coincidencia con tipología cerámica (%)	Edades más probables según coincidencia con datación por ^{14}C (aC)	Coincidencia con ^{14}C (%)
AR107*	[2014-1770]	[1533-1334] [1295-1224]	16 % 45 %	[1533-1334] [1295-1224] [1065-881]	23 % 19 % 5 %
	[1533-1334]				
	[1295-1224]				
	[1065-881]				
AR107	[2009-1772]	[1276-1226]	26 %	[1530-1364] [1276-1226] [1063-1018]	15 % 13 % 5 %
	[1530-1364]				
	[1276-1226]				
	[1063-1018]				
AR112	[2004-1776]	[1300-1229] [1061-888]	8 % 24 %	[1523-1331] [1300-1229] [1061-888]	24 % 19 % 4 %
	[1523-1331]				
	[1300-1229]				
	[1061-888]				
AR113*	[2080-1907]	[1270-1195] [1093-1024]	22 % 28 %	[1590-1377] [1270-1195] [1093-1024]	12 % 20 % 13 %
	[1850-1736]				
	[1590-1377]				
	[1270-1195]				
AR113	[2074-1936]	[1258-1198] [1088-1035]	21 % 21 %	[1587-1406] [1258-1198] [1088-1035]	4 % 16 % 11 %
	[1827-1739]				
	[1587-1406]				
	[1258-1198]				
AR115*	[2045-1752]	[955-859]	48 %	[1560-1370] [1270-1210] [1078-1019]	14 % 16 % 9 %
	[1560-1370]				
	[1270-1210]				
	[1078-1019]				
AR115	[2200-1933]	[934-800]	67 %	[1651-1417] [1259-1033]	1 % 57 %
	[1823-1692]				
	[1651-1417]				
	[1259-1033]				

Tabla 4.6: Dataciones de cuatro muestras del sitio *Tul* por medio del modelo SCHA.DIF.14K con una ventana temporal entre 2500 y 500 aC. AR107 pertenece a la fase Nevada [1350 1250] aC, AR112 y 113 pertenecen a la fase Ayotla [1250 1000] aC y AR115 pertenece a la fase Manantial [1000 800] aC según Niederberger (1976). Se muestran las edades más probables según su tipología cerámica y las dataciones de ^{14}C juntos con el porcentaje de sus coincidencias. Las muestras marcadas con * denotan las intensidades obtenidas bajo todos los criterios de selección de la sección 4.3.

4.6.3. Discusión

Durante las pruebas previas al método de arqueointensidad fueron descartadas la muestra AR108 correspondiente a la fase Nevada y las muestras AR109-111 correspondientes a la fase Ayotla debido a que sus curvas de κ vs T no fueron reversibles. Durante el proceso de desmagnetización térmica de pilotos, solo las muestras AR112 y AR113 presentaron una linealidad satisfactoria. A pesar de la limitada linealidad en los diagramas de Zijderveld de las muestras AR107 y 115, se llevó a cabo el tratamiento arqueomagnético, durante el cual presentaron una tendencia a modificar su mineralogía, observada a partir de los experimentos de rapidez de enfriamiento cuya razón r_2 domina sobre la relevancia del factor r_1 (Figura 4.11), lo que confirma las alteraciones mineralógicas sufridas durante los recalentamientos. Es posible considerar las cerámicas de estos sitios dentro del cumplimiento de la condición de dominio en las leyes de Thellier, debido a que la totalidad de éstas, analizadas y no analizadas, presentan DPS (Figura 4.9).

Al realizar el análisis sobre las gráficas de Arai para la obtención de las arqueointensidades, se descartó la muestra AR114 debido a que el valor obtenido del campo $H_{RE} = 11.92 \pm 1.4\mu T$ es mucho menor al intervalo considerado dentro de los modelos globales ARCH3K.1, CALS3K.4, SCHA.DIF.14K y de la totalidad de los datos obtenidos para el centro de México. Los campos obtenidos de este análisis fueron correlacionados con las curvas de variación secular de estos tres modelos, por medio del programa de Pavón-Carrasco *et al.* (2011) obteniendo intersecciones coherentes con las tres fases cerámicas en el modelo SCHA.DIF.14K. Siendo este modelo el que tiene una mejor coincidencia con la datación de ^{14}C .

La coincidencia reportada en la Tabla 4.5 se da sobre la datación de ^{14}C , y para la edad que, arqueológicamente, se considera mas adecuada para el sitio. Sin embargo, se encontró que de las múltiples coincidencias de los valores de intensidad para las muestras AR107,112, 113 y 115 con el modelo SCHA.DIF.14K, es posible obtener correspondencias con los períodos para cada fase cerámica propuesta por Niederberger (1976). Estas coincidencias se muestran en la Tabla 4.6, en donde se observa un gran número de estas en una ventana de 1400 años (entre el 2200 y el 800 aC) a 2σ , lo que da una alta confianza a las edades calculadas (Figura 4.12). A pesar de que algunas de estas coincidencias tienen un mayor porcentaje, se eligieron las edades acotadas entre 1093 y 881 aC de todas las cerámicas analizadas debido a su

coherencia arqueológica, en particular, la tipología cerámica identificada como *Pilli blanco* es la mas representativa del asentamiento. Sin embargo la edad de la muestra AR113 debe considerarse con reservas debido a que su curva termomagnética no es totalmente reversible ($D_{\kappa T} = 0.39\%$ Figura A.2).

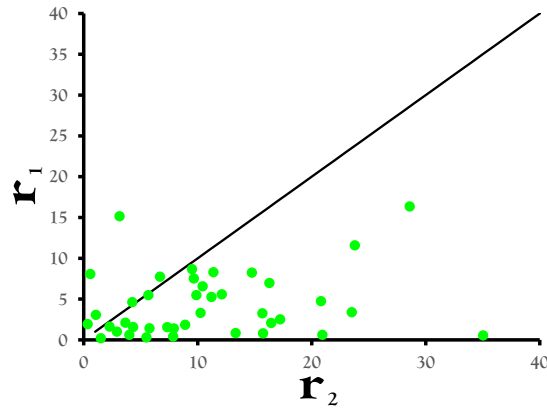


Figura 4.11: Relación entre los factores r_1 y r_2 para las muestras del sitio *Tul*.

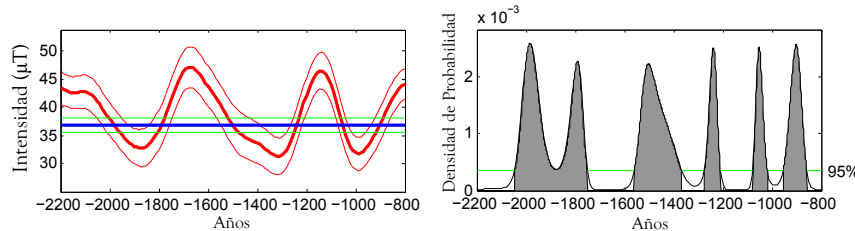


Figura 4.12: Se grafican la curva de variación secular con la intensidad de la muestras AR115 y la densidad de probabilidad para su datación en una ventana de tiempo entre 2200 a 800 dC. El nivel de referencia para una coincidencia del 95 % es de 3×10^{-4} .

A pesar de que las muestras no se presentan en la validación preliminar como las idóneas para realizar este tipo de análisis, las gráficas de Arai obtenidas en los resultados se presentan con factores $0.42 \leq f \leq 0.96$, cuyo promedio $\bar{f} = 0.67$ indica que la mayoría de las gráficas presentan una buena linealidad en alrededor del 67 % de la *TRM* adquirida en el laboratorio, un ejemplo de ello se muestra a partir de los resultados de la muestra AR113 en la Figura 4.10. Sin embargo, es la muestra AR112, la que presenta mejor linealidad en su diagrama de Zijderveld y la que posee los valores más altos

para f , g y q . En particular, llama la atención en este sitio los valores de $0.52 \leq g \leq 0.86$ con una media de 0.73; es decir, la uniformidad a lo largo de los valores donde se realiza el ajuste de la recta en la gráfica de Arai es muy cercano a lo ideal. Esto último puede también verse reflejado en la Figura 4.11 donde sólo el 10 % de todos los especímenes se ven influenciado por las transformaciones mineralógicas, a diferencia del 90 % restante para las cuales es más representativa la rapidez de enfriamiento.

4.7. La Joya, Veracruz

4.7.1. Contexto arqueológico

El sitio de La Joya (que se denotará como *LJ*) se localiza en la parte central del estado de Veracruz a 6 km de la costa, en una zona con condiciones climáticas adversas para la construcción en arquitectura de tierra (Daneels, 2008). Éste es un método de construcción antiguo que consiste en la mezcla de arcilla húmeda y arena compactada hasta una densidad requerida dependiendo de la técnica de construcción (Gallipoli *et al.*, 2014). La ocupación continua de este sitio desde el 1600 a.C. se conoce por medio de las evidencias cerámicas encontradas en los materiales de relleno (Daneels *et al.*, 2013), sin embargo, la primera construcción es de alrededor del 200 a.C. Los materiales analizados en este trabajo provienen de la plataforma Este, fuertemente dañada por la extracción de material en tiempos recientes, por lo que sólo queda la parte Noreste de la estructura. Esta plataforma tiene seis etapas constructivas englobadas en los períodos Clásico Medio y Tardío (300 - 1000 d.C.). Dentro de esta plataforma, la etapa IIIA fue una estructura principal con funciones residenciales. Estas estructuras eran desmanteladas y quemadas con propósitos rituales, y de los restos de este proceso Daneels *et al.* (2013) obtienen material para datación por ^{14}C debido a que las cerámicas, figurillas y víctimas humanas eran ofrecidas para demostrar la importancia de este acto a los ocupantes del sitio. Daneels (2008) reporta edades de ^{14}C asociadas a las cerámicas usadas en este trabajo de 1590 ± 50 A.P. para la fase IIIA inferior (III Ain f) y 1570 ± 40 A.P. para la fase IIIA superior (III A sup) (no calibradas). Los materiales asociados a la fase IIIA inferior son cerámicas (un cajete tipo Potrerillo y un incensario donde se observa cocción incompleta de la pasta) y un fragmento de bajareque quemado perteneciente a un techo. De la fase IIIA superior se analizaron cerámicas tipo Potrerillo y bajareque

quemado perteneciente a una pared y a un techo.

4.7.2. Resultados

A pesar de que el sitio de la Joya no se encuentra dentro de la Cuenca de México, se eligió este sitio por estar dentro de un intervalo de latitudes aceptable para utilizar cualquier curva de variación secular sin tener que hacer correcciones por latitud. En esta sección se presentan los resultados del análisis realizado a las muestras cerámicas y a los bajareques quemados, materiales representativos de las dos etapas constructivas antes mencionadas. Los materiales arqueológicos incluyen cerámicas y bajareques quemados. Se analizaron 3 cerámicas y un bajareque quemado asociados al nivel IIIASuperior y la misma cantidad de cerámicas y bajareque para el nivel IIIAInferior. De este nivel solo se descartó un bajareque quemado (Tabla 4.7). De las 9 muestras propuestas en un inicio, solo se analizaron 8 y de éstas, solo de 6 se obtuvieron dataciones coincidentes con el contexto arqueológico y con coincidencias con las dataciones de ^{14}C obtenidas por Daneels (2008) (Tabla 4.8).

Las curvas κ vs T para los materiales de este sitio, se agrupan en dos morfologías, una reversible y otra no reversible casi en su totalidad (Figura 4.13). Las primeras se presentan asociadas a los materiales arqueológicos analizados para la etapa IIIASuperior mientras que las segundas se asocian a la etapa IIIAinferior que presentan el fenómeno de *pinza*. Este fenómeno se da a temperaturas relativamente bajas ($T_{amb}, \sim 250^{\circ}C$) y se observa que en la curva de calentamiento, la susceptibilidad disminuye en forma de pequeños escalones no mayores a 4 *unidades* en función del aumento de la temperatura; mientras que en la curva de enfriamiento la susceptibilidad disminuye en escalones del mismo orden en función del descenso de la temperatura.

De los ciclos de histéresis se obtuvieron los parámetros para poder construir la gráfica de Day. En la Figura 4.14 se presentan dichos resultados.

A partir del método de arqueointensidad se obtuvieron edades para las cerámicas aceptadas (Tabla 4.7). Los resultados se muestran en la Tabla 4.8 donde se presentan solo las medias del campo corregido para cada cerámica.

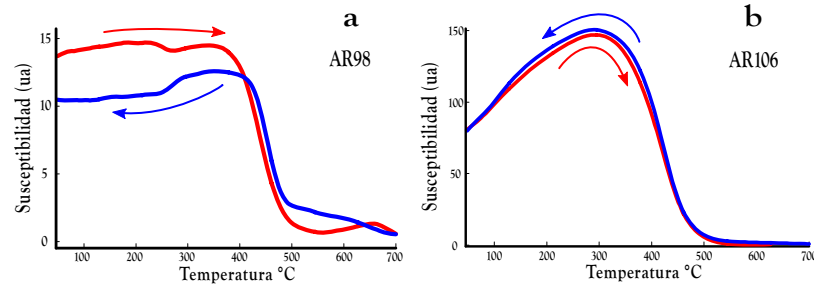


Figura 4.13: Ejemplo de curvas κ vs T para el sitio LJ. Estas curvas se agrupan en dos diferentes morfologías teniendo el grupo **a** relación con la etapa IIIA inferior y el grupo **b** relación con la etapa IIIA superior. Las curvas asociadas a la etapa IIIA inferior presentan el fenómeno de *pinza* y son en su mayoría no reversibles por completo, mientras que las curvas asociadas a la etapa IIIA superior son reversibles en su totalidad.

Muestra	Descripción	$D_{\kappa T}$ (%)	T_C (°C)	$\overline{\chi_{df}}$ %	Mineralogía
AR98 ¹	Cajete Potrerillo	0.1	437	6.95	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR99 ¹	Incensario (cocción incompleta)	0.16	498	-	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR100 ¹	Incensario (mismo que AR99)	0.14	509	6.12	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR101 ^{2NR}	Bajareque de techo	0.03	552	-	TiMag pobre en Ti
AR101 ^{2R}	Bajareque de techo	0.2	530	-	TiMag pobre en Ti
AR102 ¹³	Bajareque de techo	0.15	470	-	TiMag pobre en Ti
AR103 ²	Potrerillo Guinda	0.15	535	2.23	TiMag pobre en Ti
AR104 ²	Potrerillo Naranja (fondo)	0.08	534	-	TiMag pobre en Ti
AR105 ²	Potrerillo Naranja (cuerpo)	0.05	534	5.6	TiMag pobre en Ti
AR106 ^{1NR}	Bajareque de pared	0.47	486	-	TiMag pobre en Ti
AR106 ^{1R}	Bajareque de pared	0.04	420	-	TiMag pobre en Ti

Tabla 4.7: Relación de las muestras analizadas con su tipología cerámica. $D_{\kappa T}$ es la diferencia porcentual entre las integrales de cada curva κ vs T y la T_C general de la muestra para el calentamiento. ¹ el valor de la T_C se obtuvo a partir del método de la segunda derivada y ² el valor de la T_C fue obtenido a partir del método de Moskowitz (1981), ³ son las muestras rechazadas debido a que no fueron reversibles y/o la desmagnetización térmica de sus pilotos no fue satisfactoria. ^{NR} pertenecen a la porción No Reducida de un bajareque quemado, mientras que ^R pertenecen a la porción Reducida.

Muestra	$H_{RE}(\mu T)$	Etapas	Datación por SCHA.DIF.14K (años d.C.)	Coincidencia entre dataciones (%)
AR98*	43.2 ± 1.7	III Ainf	[544 942]	18
AR98	41.1 ± 2.1	III Ainf	[559 928]	10
AR99*	59.6 ± 5	III Ainf	[837 885]	0
AR100*	34.6 ± 1.8	III Ainf	n/d	n/d
AR100	35.3 ± 1.7	III Ainf	n/d	n/d
AR101*	54.9 ± 2.2	III Ainf	[300 498]	59
AR103	37.6 ± 3.8	III Asup	n/d	n/d
AR104*	48.9 ± 2.2	III Asup	[624 643]	0
AR104	49 ± 1.9	III Asup	[834 894]	0
AR105*	38.3 ± 2.8	III Asup	[560 852]	5
			[864 925]	0
AR105	40.2 ± 1.6	III Asup	[565 837]	2
			[886 916]	0
AR106*	41 ± 1.7	III Asup	[560 846]	5
			897 924	0
AR106	43.2 ± 1.9	III Asup	[541 946]	17

Tabla 4.8: Relación de muestras analizadas con la etapa constructiva según Daneels *et al.* (2013). H_{RE} intensidad corregida por rapidez de enfriamiento del campo \mathbf{H}_{ANT} con su incertidumbre. * son las muestras que cumplieron con todos los criterios de la sección 4.3 (ver Apéndice A). Las dataciones resaltadas son las aceptadas por su correspondencia con el contexto arqueológico. Los cálculos de las dataciones se realizaron dentro de una ventana de tiempo de 300 dC y 1000 dC (ver sección 3.2). Las coincidencias se dan sobre las dataciones por ^{14}C dadas por Daneels (2008).

4.7.3. Discusión

A partir de los pilotos analizados durante las pruebas previas al método $T - C$, se descartó la muestra AR102 debido a que no cumplía con una linealidad satisfactoria ($MAD < 17^\circ$) en su diagrama de Zijderveld. La muestra AR100 presenta una doble componente en su diagrama de Zijderveld, y considerando que es un fragmento de incensario, se puede atribuir a un recalentamiento.

Por otro lado las curvas de κ vs T muestran una significativa diferencia entre las cerámicas de la etapa IIIAinferior y IIIAsuperior. La mineralogía presente en las primeras (grupo **a** muestras AR98-100) tiene un espectro de T_C a bajas temperaturas (correspondiente a componentes mineralógicas de titanomagnetita con alto contenido de Ti), fenómeno que no se observa en las segundas (grupo **b** muestras AR101-106). Las curvas de estas últimas se presentan reversibles en su totalidad, lo que provee de una alta confiabilidad en sus dataciones (Figura 4.17). Sin embargo las cerámicas de la etapa

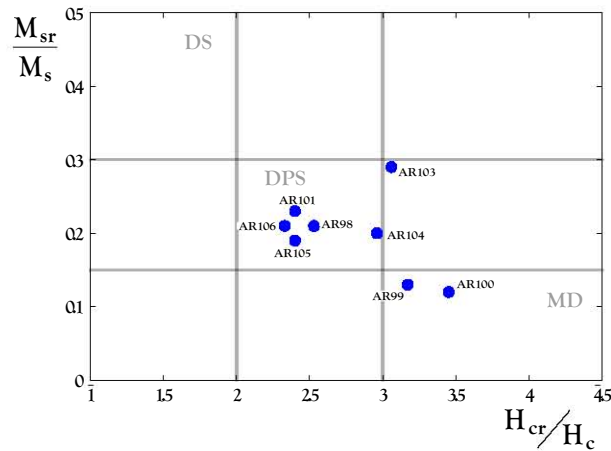


Figura 4.14: Gráfica de Day para las cerámicas del sitio *LJ*. Se utilizan los valores límites de Dunlop (2002b) para definir los dominios.

III A inferior tienden a no ser reversibles a temperaturas por debajo y cercanas a la T_C global del material. El fenómeno de *pinza* que se presenta en estas curvas, sugiere la transformación de la mineralogía original a una mineralogía magnética de bajas temperaturas de Curie, posiblemente titanomagnetitas ricas en Ti. Para la mayoría de las muestras, el factor r_2 es más relevante que el factor r_1 (Figura 4.15), sin embargo no es posible afirmar que para todas las muestras analizadas no sea relevante la rapidez de enfriamiento, debido a que existe una dispersión para valores grandes de r_2 .

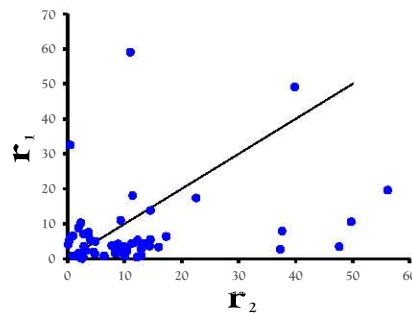


Figura 4.15: Relación entre los factores r_1 y r_2 para las muestras del sitio *LJ*.

Las edades obtenidas para este grupo de cerámica tiene una buena concordancia con la estratigrafía de la edificación. Se pudieron obtener tres dataciones de la etapa III A superior, usando tres de los cuatro materiales

pertenecientes a esta etapa (Tabla 4.8). Se consideraron las edades que tienen coincidencia con los intervalos conocidos de las dataciones por ^{14}C , a pesar de que existe en todos los casos, para las cerámicas de esta etapa, una segunda coincidencia alrededor de [864 925] dC. Esta segunda coincidencia no tiene correspondencia arqueológica, siendo una casualidad debido a que, en la morfología de la curva de variación, se encuentra un mínimo importante alrededor de estas edades.

Similarmente sucede para las muestras consideradas para la etapa IIIA inferior ya que de las cuatro muestras pertenecientes a esta etapa, sólo de dos se obtuvieron edades que tienen significado en este contexto arqueológico. Análogamente a los valores de los campos de la etapa anterior, la intensidad registrada en estas muestras se sucede en una región de la curva que se presenta cuasiconstante, provocando que existan dos dataciones posibles a 1σ (Figura 4.17). Sin embargo, de nuevo se consideran únicamente las que tienen coincidencia con las dataciones de ^{14}C . Así, los intervalos más tempranos coincidirían con la etapa II (Daneels *et al.*, 2013), lo que estratigráficamente no es posible.

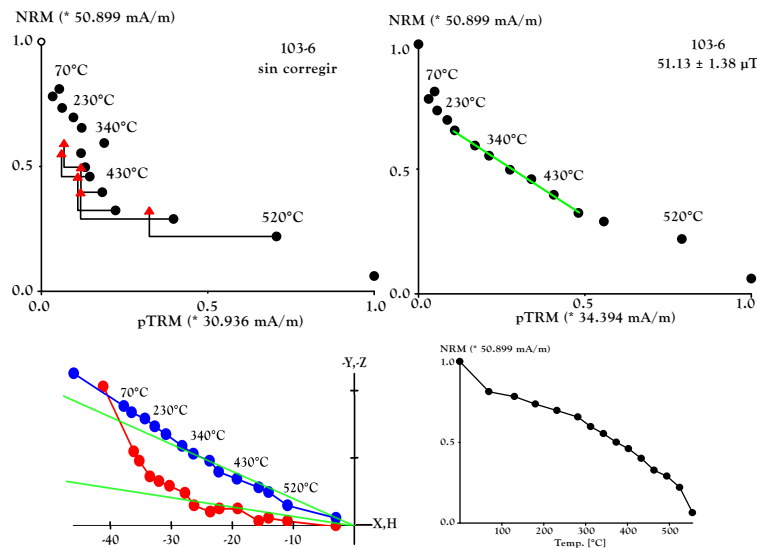


Figura 4.16: Gráfica de Arai, diagrama de Zijderveld y espectro de desmagnetización que ejemplifica el comportamiento de la muestra AR103.

Se identifica un rasgo importante en estas dataciones, derivado del tipo de material analizado. La fiabilidad de las intensidades obtenidas a partir de diferenciar los materiales: la desviación estándar así como los parámetros

de Coe *et al.* (1978) los cuales se presentan, en general, con valores más confiables para los bajareques que para las cerámicas. Esto se confirma con la identificación de los dominios en las muestras ya que los bajareques tienden a estar agrupados dentro de los DPS más cerca de los DS que la totalidad de las cerámicas, cuyos dominios se identifican como PDS y MD (Figura 4.14).

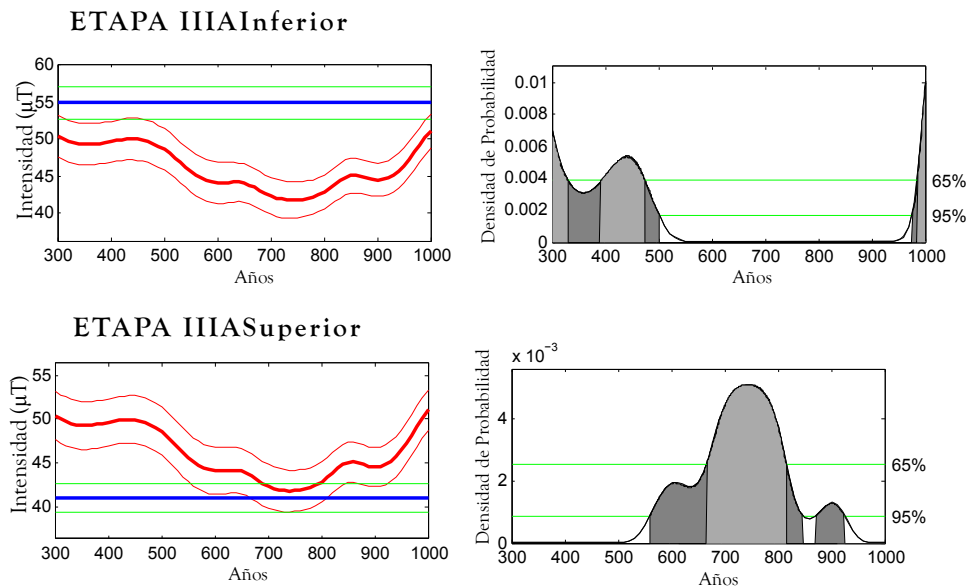


Figura 4.17: Se grafican la curva de variación secular con la intensidad y la densidad de probabilidad para su datación en una ventana de tiempo entre 300 a 1000 aC. El nivel de referencia para una coincidencia del 95 % es de 1×10^{-3} y para el 65 % es de 3×10^{-3} en la muestra AR101. Y para la muestra AR106 de 8×10^{-4} para el 95 % y de 2×10^{-3} .

Las gráficas de Arai obtenidas para este sitio, cubren las hipótesis para poder realizar la corrección por los controles de calentamiento durante el proceso de $T - C$ propuesto por Valet *et al.* (1996). Un ejemplo del uso de esta corrección se presenta en la Figura 4.16, en donde se observa la concavidad en la gráfica de Arai entre 370 y hasta los 550°C y una linealidad aceptable en el diagrama de Zijderveld.

4.8. Plaza Gamio

4.8.1. Contexto arqueológico

En función de crear un acceso a la zona arqueológica y sitio del Templo Mayor de Tenochtitlan (centro de la Ciudad de México), en el 2009 el INAH inició los trabajos de investigación en la Plaza Manuel Gamio (que se denotará como *PG*) localizada en el ángulo exterior Suroeste del sitio. Estas excavaciones mostraron las etapas IV, IVa, V y VI que van del 1440 al 1502 dC, en donde se localizó la estructura conocida como *Cuauhxicalco* (Barrera Rodríguez *et al.*, 2012). Las cerámicas estudiadas en este trabajo son del tipo ceremonial y dos de ellas están asociadas al *Xócotl*, el árbol sagrado de los mexicas.

Muestra	Descripción	$D_{\kappa T}$ (%)	T_C (°C)	$\overline{\chi_{df}}$ %	Mineralogía
AR89 ¹	Saumador	0.63	516	18.82	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR90 ^{1NR}	Brasero	0.17	455	-	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR90 ^{1R}	Brasero	0.04	485	13.64	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR91 ¹	Saumador	0.15	483	14.94	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR92 ¹	Arcilla negra/restos de estuco	0.2	424	12.73	TiMag pobre en Ti
AR93 ¹	Arcilla negra/restos de estuco	0.11	457	14.26	TiMag pobre en Ti
AR94 ¹	s/d	0.62	499	-	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR95 ¹³	s/d	0.15	453	-	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR96 ¹	s/d	0.27	455	15.02	TiMag pobre en Ti + rica en Ti
AR97 ¹	s/d	0.12	507	-	TiMag pobre en Ti + rica en Ti

Tabla 4.9: Relación de las muestras analizadas del sitio *PG* con su tipología cerámica. $D_{\kappa T}$ es la diferencia porcentual entre las integrales de cada curva $\kappa vs T$ y la T_C general de la muestra para el calentamiento. ¹ el valor de la T_C se obtuvo a partir del método de la segunda derivada y ² el valor de la T_C fue obtenido a partir del método de Moskowitz (1981), ³ son las muestras rechazadas debido a que no fueron reversibles y/o la desmagnetización térmica de sus pilotos no fue satisfactoria. ^{NR} pertenecen a la porción No Reducida de la cerámica, mientras que ^R pertenecen a la porción Reducida.

4.8.2. Resultados

Se obtuvieron de este sitio 9 cerámicas de las cuales una se descartó (Tabla 4.9) y solo de dos se obtuvieron dataciones por arqueointensidad con coincidencia en la ventana temporal asociada a las etapas constructivas del Templo Mayor IV, V y IV (Tabla 4.10).

Las curvas κ vs T de este sitio se pueden agrupar en tres diferentes grupos. El primero que se identifica, son las curvas reversibles pertenecientes a las muestras AR92 y 93 con una sola componente magnetomineralógica (Figura 4.18 a). El segundo grupo tiene la morfología de *pinza* que también presenta el sitio LJ, donde se observan varias fases mineralógicas coincidentes para cada uno de los escalones (Figura 4.18 b) . Y por último, existe un tercer grupo de curvas no reversibles con un espectro de T_C definidas en la misma temperatura tanto para el calentamiento como para el enfriamiento (Figura 4.18 c).

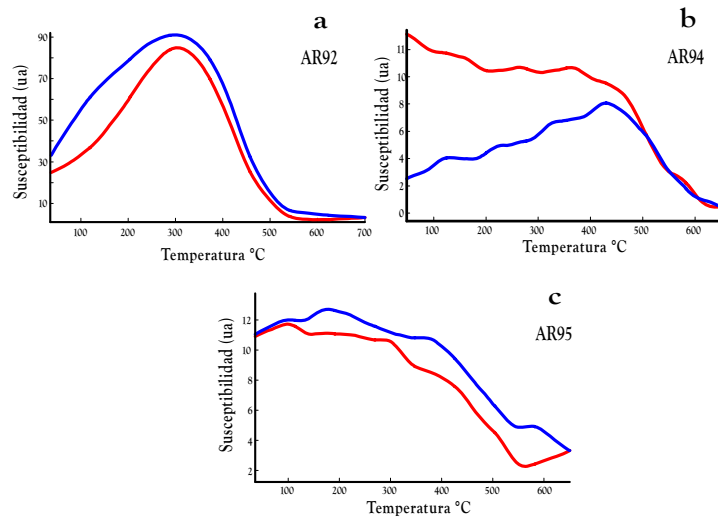


Figura 4.18: Ejemplo de curvas κ vs T para el sitio PG. Estas curvas se dividen en tres grupos: **a** son curvas reversibles y con una componente mineralógica definida, **b** son curvas no reversibles con la morfología de *pinza* semejante al sitio LJ indicando la presencia de componentes de titanomagnetita rica en Ti, y **c** son curvas no reversibles con un espectro de T_C definido para las mismas temperaturas en la curva de calentamiento y de enfriamiento con posible presencia de varias componentes de titanomagnetitas ricas en Ti.

De los ciclos de histéresis se obtuvieron los parámetros para poder construir la gráfica de Day. En la Figura 4.21 se presentan dichos resultados.

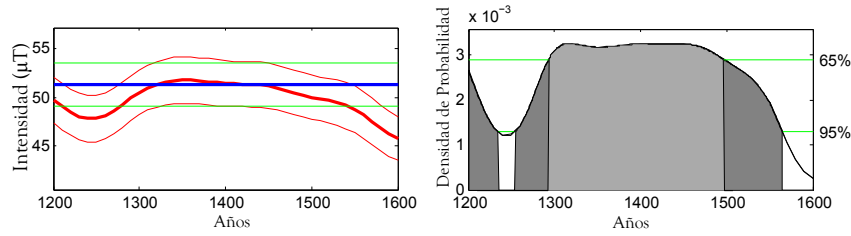


Figura 4.19: Se grafican la curva de variación secular con la intensidad de la muestras AR97 y la densidad de probabilidad para su datación en una ventana de tiempo entre 1200 a 1600 aC. El nivel de referencia para una coincidencia del 95 % es de 1×10^{-3} y para el 65 % es de 2×10^{-3} .

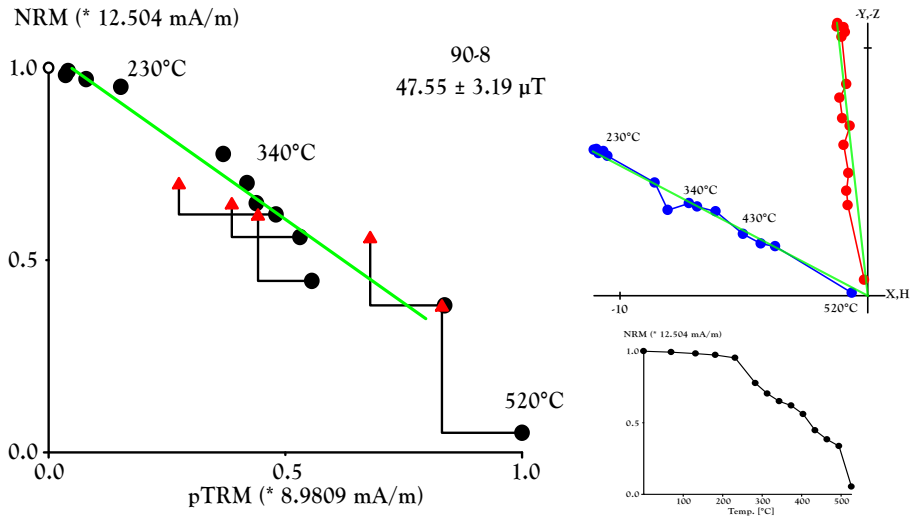


Figura 4.20: Gráfica de Arai, diagrama de Zijderveld y espectro de desmagnetización que ejemplifica el comportamiento de la muestra AR90.

A partir del método de arqueointensidad se obtuvieron valores para las cerámicas aceptadas (Tabla 4.9). Los resultados se muestran en la Tabla 4.10 donde se presentan las medias del campo corregido para cada cerámica.

Muestra	$H_{RE}(\mu T)$	Datación por SCHA.DIF.14K (años d.C.)
AR89*	10.3 ± 0.2	-
AR89	12.3 ± 1.1	-
AR90	45.7 ± 1	[1569 1790]
AR91*	41.4 ± 2.5	[1569 1786]
AR91	37.3 ± 2	-
AR92*	30 ± 2	-
AR92	30.4 ± 1.2	-
AR93*	35.1 ± 2.2	-
AR93	35.5 ± 1.9	-
AR94	53.1 ± 2.9	[1258 1562]
AR96*	46.4 ± 3.3	[1173 1345]
AR96	34.4 ± 2.1	-
AR97*	51.3 ± 2.2	[1255 1564]
AR97	50.8 ± 1.7	[1257 1563]

Tabla 4.10: Relación de muestras analizadas. H_{RE} es la intensidad corregida por rapidez de enfriamiento del campo \mathbf{H}_{ANT} con su incertidumbre. * son las muestras que cumplieron con todos los criterios de la sección 4.3 (ver Apéndice A). Las dataciones resaltadas son las aceptadas por su correspondencia con el contexto arqueológico y cuyos valores se consideran en coincidencia con el modelo de la curva de variación secular SCHA.DIF.14K. Las dataciones se realizaron en una ventana de tiempo entre 1200 dC y 1800 dC.

4.8.3. Discusión

Estas muestras presentaron complicaciones durante su análisis de arqueointensidad, en parte por la diversidad mineralógica, observando variaciones en cada uno de los experimentos realizados, tanto de mineralogía magnética como los efectuados para obtener la arqueointensidad.

Los datos presentados en la gráfica de Day 4.21 tienen una gran distribución a lo largo de los rangos para DS y PSD. Esta información no puede ser interpretada como una gran variabilidad de dominios que cumplen con las hipótesis de las leyes de Thellier a pesar de su aspecto, sino como el resultado de la señal producida por más de dos componentes magnetomineralógicas que integran cada una de las muestras. Esta deducción se hace a partir de las gráficas κ vs T en las que se observa que, salvo las muestras AR92 y AR93 que presentan sólo una componente mineralógica, las demás muestras presentan una gran variedad de componentes mineralógicas obtenidas a partir de las T_C observadas (Tabla A.6).

Es posible apreciar que las muestras AR89, 90, 91, 94, 95 y 96 no son reversibles en su totalidad y presentan varias componentes mineralógicas a bajas temperaturas ($< 300^\circ C$), con componentes principales alrededor de

los 450 y 520 °C. Se hizo una comprobación similar a la realizada con los bajareques del sitio de *LJ*, con respecto a materiales reducidos y no reducidos que pueden presentarse en las cerámicas. Se analizó la corteza no reducida y el núcleo de reducción de la cerámica AR90 encontrando que la curva de calentamiento de la reducida presenta un pico de Hopkinson, asociado a la presencia de MD (Alva-Valdivia *et al.*, 2013), alrededor de los 400°C. Las muestras AR94 y 97 presentan el fenómeno de “pinza” a bajas temperaturas, siendo más visible en AR94 (Figura 4.18 *b*) que presenta cinco cambios abruptos en la susceptibilidad a diferencia de la muestra AR97 que presenta solo cuatro cambios poco visibles (Figura A.4).

Estos resultados de $\kappa vs T$ se traducen en una falta de estabilidad de los datos obtenidos durante el método de $T - C$ para todas las muestras, a excepción de AR92 y AR93. A pesar de que estas dos últimas se presentaron con las mejores propiedades para llevar a cabo el método de $T - C$, no se obtienen dataciones con coincidencia en la curva de VS SCHA.DIF.14K, siendo las muestras AR94 y 97 las únicas que presentan coincidencia con esta curva (Tabla 4.10) y cuyas edades a 2σ abarcan aproximadamente 310 años (Figura 4.19), periodo dentro del que se pueden encontrar todas las etapas constructivas del Templo Mayor.

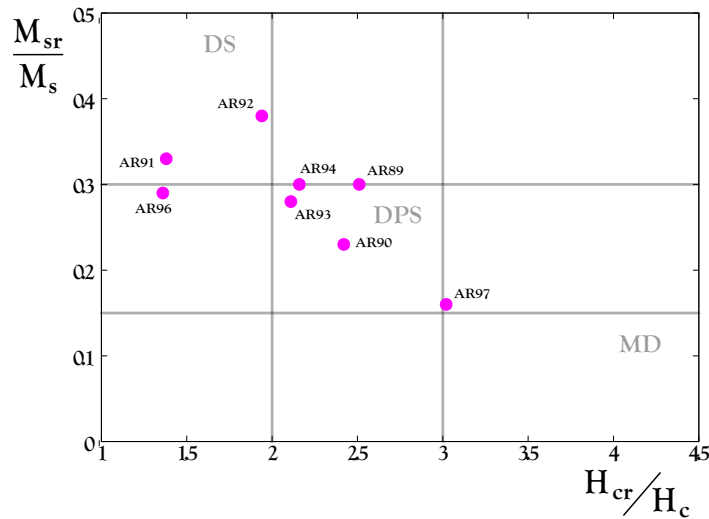


Figura 4.21: Gráfica de Day para las cerámicas del sitio *PG*. Se utilizan los valores límites de Dunlop (2002b) para definir los dominios.

Capítulo 5

Discusión y Conclusiones

Es a partir de los coeficientes propuestos por Coe *et al.* (1978), que puede darse una interpretación de calidad y coherencia a los resultados obtenidos por el método de arqueointensidad. En este sentido, los factores de calidad de las muestras cerámicas de todos los sitios están acotados por un mínimo de 3 y un máximo de 26.6, valores relativamente bajos si observamos los obtenidos anteriormente (Alva-Valdivia *et al.*, 2010; Fanjat *et al.*, 2013; López-Téllez *et al.*, 2008; Morales *et al.*, 2013; Pétronille *et al.*, 2012; Pineda Duran *et al.*, 2010; Rodríguez Ceja *et al.*, 2009).

Igualmente sucede con el coeficiente f , observándose que el porcentaje de la TRM usada para determinar la intensidad está entre 32 y 100 % para todos los sitios. Esta amplia distribución de porcentajes para los sitios estudiados, demuestra que existen especímenes de una misma muestra sobre los cuales, no es posible determinar una intensidad con parámetros fiables.

Las curvas κ vs T que se observan en los sitios LJ y PG , presentan una morfología peculiar en forma de *pinza*. Esta forma también fue identificada por Rodríguez Ceja *et al.* (2009), y está asociada a cerámicas con dos o más componentes magnetomineralógicas que coexisten en el material. Estas componentes presentan una fase de titanomagnetita pobre en titanio y una o varias fases igualmente de titanomagnetita rica en titanio. Además, debido a la ubicación de las muestras en una zona lacustre de los sitios de San Gregorio y Plaza Gamio así como la del sitio La Joya en Veracruz (región con precipitaciones de entre 1500 a 2000 mm por año Daneels *et al.* (2013)), es posible la presencia de goetita (Ortega *et al.*, 2002).

Los valores del factor $D_{\kappa T}$ son poco sensibles para la identificación de la reversibilidad de las muestras. Se puede observar que existe una diferencia

apenas del 12 % entre los valores de $D_{\kappa T}$ para las muestras AR113 y AR1225, sin embargo es claro que la curva de la muestra AR113 no cumple con una reversibilidad satisfactoria a diferencia de la curva reversible que presenta la muestra AR1225. Es por ello que se usó la evaluación cualitativa de la gráfica de la diferencia entre las integrales para complementar la poca sensibilidad que presenta el factor $D_{\kappa T}$ para el caso de este tipo de curvas de κ vs T .

En los sitios LJ y SG se analizaron muestras de un incensario y un comal respectivamente (Figura 5.1), con la intención de observar la diferencia entre las temperaturas de cocción de la pieza y de su uso (para preparación de alimentos o ceremonial). Del incensario se reconocieron las zonas mas probables que estuviesen: alejadas de la fuente y en contacto con ella. Así también para el comal, se reconoce el cuerpo y el borde de la pieza. En ambos casos, la componente primaria se encuentra por encima de los $370^{\circ}C$. En el caso del comal se observa un recalentamiento alrededor de los $340 \pm 50^{\circ}C$ y un último recalentamiento a los $280^{\circ}C$, a diferencia del incensario, en donde la inestabilidad de la dirección en los diagramas de Zijderveld de todos los especímenes pertenecientes al interior de esta pieza (*cuerpo*), puede ser interpretada como calentamientos secundarios a diversas temperaturas (Morales *et al.*, 2012). A partir de esta información, es posible hacer una comparación de las temperaturas de segundo uso con el tipo de fuentes usadas, ya que para el incensario la fuente es ciertamente más pequeña, además de que, en ocasiones, los incensarios llegan a tener una estructura cerrada provocando atmósferas reductoras (Morales *et al.*, 2012), a diferencia de las fuentes usadas para un comal. A partir de estas deducciones se identificó que la muestra AR1184 también presenta un recalentamiento, con una temperatura máxima en la componente secundaria bien definida entre los 280 y $310^{\circ}C$, lo que podría determinar su uso con mayor precisión como doméstico para la preparación de alimentos.

El método de $T - C$ se realizó primero en un grupo de seis muestras pertenecientes a los sitios PG y LJ. Utilizando el protocolo de Biggin y Perrin (2007) adaptado al método, se midió la magnetización antes (a) y después (d) de desmagnetizar por campo alterno con $5mT$, después del calentamiento con campo ($TRMp$) y sin campo ($RNMP$). Se compararon los espectros de desmagnetización encontrando que:

- Para PG: $TRMp_d - TRMp_a \approx 10\%$
- Para LJ: $TRMp_d - TRMp_a \approx 4\%$

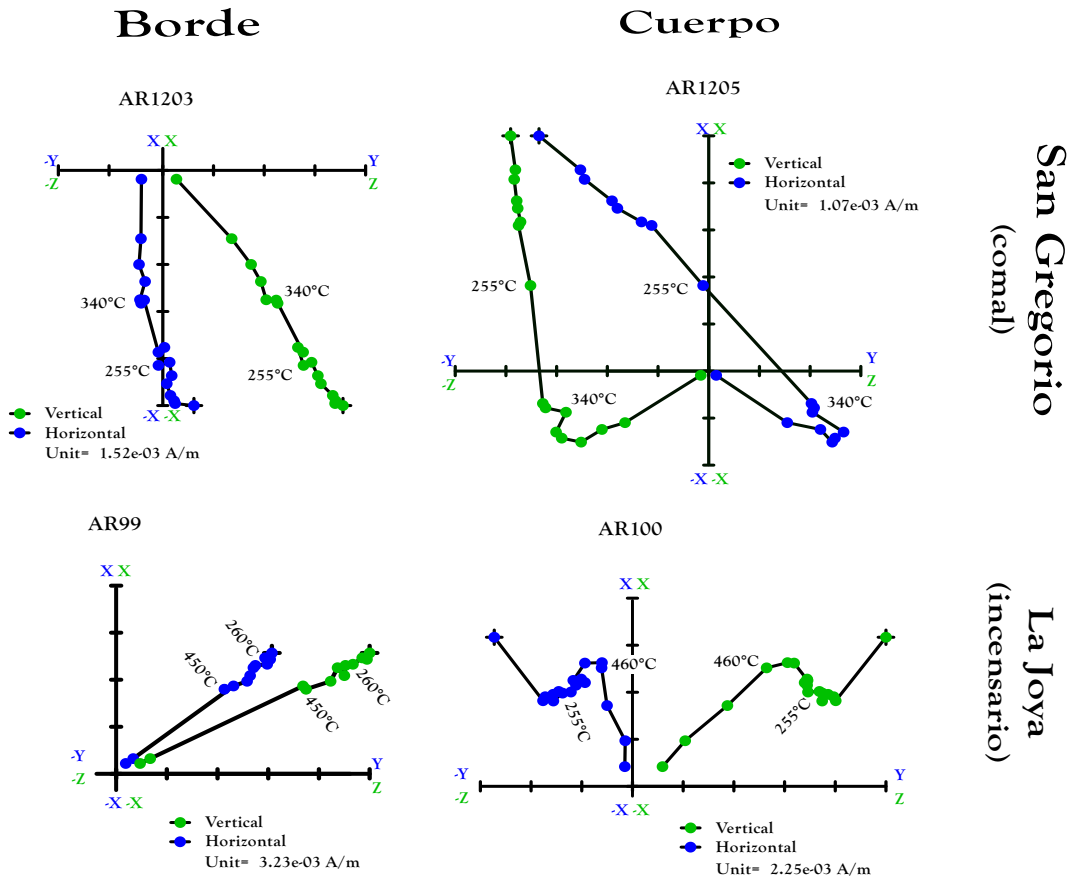


Figura 5.1: Diagramas de Zijderveld de cuatro muestras. Dos de ellas (AR1203 y 1205) pertenecen al sitio *SG* y formaban parte de un comal, mientras que las otras dos (AR99 y 100) pertenecen al sitio *LJ* y formaban parte de un incensario.

- Para *PG* y *LJ*: $RNMp_d - RNMp_a \approx 1\%$

Estas diferencias porcentuales nos muestran que existen materiales para los cuales, aplicar $5mT$ después del calentamiento con campo (Biggin y Perrin, 2007) si es significativo (para el sitio de *PG*). En el caso de estos dos sitios, los dominios que presenta el sitio *PG* tienden a distribuirse desde *SD* hasta *DPS* mientras que los observados del sitio *LJ* son predominantemente *DPS*. Este resultado está particularmente fuera de lo esperado, ya que este protocolo debería ser representativo para las muestras que contengan componentes de dominios múltiples (Dunlop, 2011).

Soler-Arechalde (2014) denota la falta de datos alrededor del 1200 al

300 aC, 1100 al 1300 dC, así como de una mayor densidad de datos entre el 100 aC y el 500 dC. En este estudio se abarcan dos periodos en el Preclásico (sitio *Tul*), uno en el Clásico (sitio *LJ*) y uno en el Posclásico (sitios *PG* y *SG*). En la Figura 5.2 se encuentra la distribución del número de determinaciones de intensidad del CGM con una datación de ^{14}C asociada. Las intensidades obtenidas para el sitio *Tul* y parte de las obtenidas para el sitio *LJ* aportan 4% de datos nuevos a la curva de variación secular para el centro de México. En el caso del sitio en Tulyehualco, las cerámicas mas representativas están dadas por la tipología Ayotla y Nevada, por lo que la intensidad promedio para estas fases (Tabla 5.1) procuraría de ésta nueva información a la curva de VS. En el caso del sitio de La Joya en Veracruz se obtuvieron intensidades para cada una de las etapas constructivas, y debido a que Daneels (2008) presenta dataciones de ^{14}C para cada etapa, las intensidades promedio reportadas en la Tabla 5.1 aportarían los datos para la curva de VS.

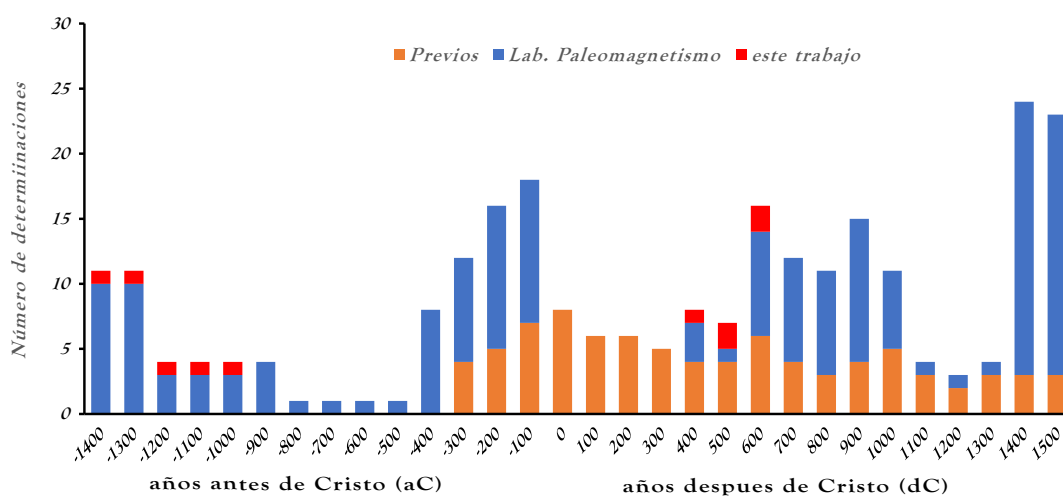


Figura 5.2: En rojo las determinaciones presentadas en este trabajo comparados con los datos reportados por Soler-Arechalde (2014) en donde los azules son datos obtenidos en el Laboratorio de Paleomagnetismo en el Instituto de Geofísica y los anaranjados los publicados por otros autores (ver la Sección 3.3).

Las dataciones realizadas en los sitios *SG*, *Tul* y *PG* tuvieron un bajo porcentaje de éxito debido a las propiedades magnetomineralógicas de los materiales. Tan solo el 14% para *SG* y el 25% para *PG*, esto contrasta con el sitio *LJ* con un 44% y 40% para *Tul*. Sin embargo, los resultados adversos del método se deben probablemente a dos situaciones: una referente

a la viabilidad de la muestra derivada de la estabilidad de la señal y de la mineralogía magnética, y la otra asociada al valor del campo obtenido, que puede no tener relación alguna con la curva de variación secular utilizada para la datación. En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de los valores del campo y su MDVA.

Sitio	Arqueointensidad promedio (μT)	Momento dipolar virtual axial promedio ($\times 10^{22} A/m^2$)
San Gregorio	32.5 ± 2.96	8.43 ± 0.67
Tulyehualco (Fases Nevada y Ayotla)	36.3 ± 0.86	8.17 ± 0.19
Tulyehualco (Fase Manantial)	26.1 ± 10.1	5.9 ± 2.27
La Joya (Etapa IIIAinferior)	47.7 ± 4.7	10.73 ± 0.11
La Joya (Etapa IIIAsuperior)	42.5 ± 2.1	9.56 ± 0.48
Plaza Gamio	37.4 ± 4.2	$8.0.97$

Tabla 5.1: Intensidades promedio por sitio usando los valores de intensidad y MDVA del grupo completo de cerámicas pertenecientes a cada sitio con su error estándar asociada.

Es posible apreciar en la Figura 5.3 que dos de los MDVA's correspondientes al sitio *LJ* (AR101 y AR104) tienen una gran coincidencia con los valores del MDVA's existente en la base de datos de GEOMAGIA (Brown *et al.*, 2015). Todo lo contrario para los valores obtenidos en los sitios *PG* y *SG* que se centran entre dos agrupaciones tanto de los datos presentados en Brown *et al.* (2015), como los recopilados por Soler-Arechalde (2014). En esta misma gráfica también se exponen los datos cuyos valores de campo no tuvieron una coincidencia con la curva de VS SCHA.DIF.14K y por lo tanto no se obtuvieron dataciones (puntos rojos en la Figura 5.3), estos puntos se colocaron en la gráfica considerando la temporalidad asociada a las cerámicas. Es fácil reconocer que estos valores para los sitios *SG* y *PG* se aconglomeran justo en la región donde los datos presentados por Soler-Arechalde (2014) también están agrupados. Esto podría ser una aproximación a una región de la curva de variación secular para el centro de México, que no tiene correspondencia con alguno de los modelos globales.

En el caso del sitio de *PG* se tuvieron cerámicas que abarcaron las etapas constructivas IV y IVa (aproximadamente entre 1440 y 1469 d.C), V y VI (aproximadamente entre 1486 a 1502 dC) y se concluyó que no es

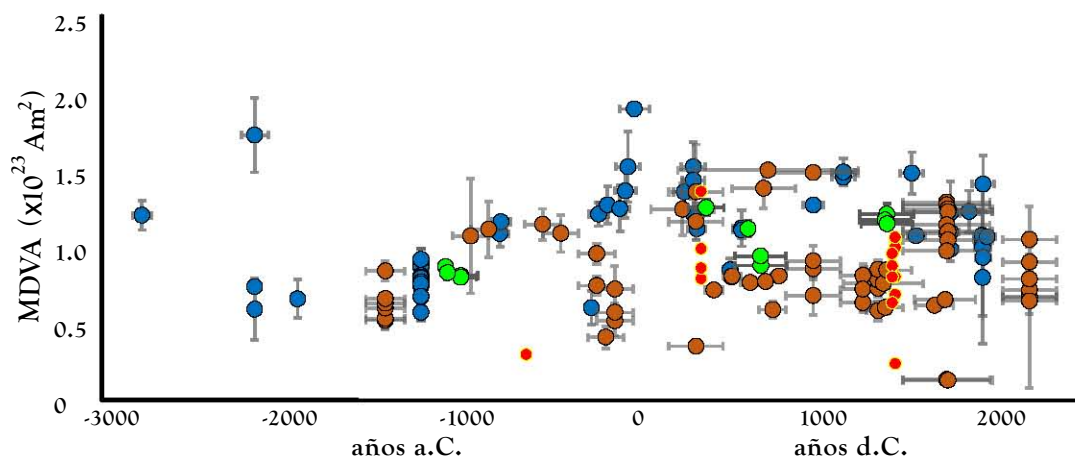


Figura 5.3: Recopilación de los valores para el MDVA del centro de México por la base de datos Geomagia (Brown *et al.*, 2015) (en azul) y la información presentada por Soler-Arechalde (2014) para la curva de variación secular de intensidad en la misma región (en café). Los puntos en verde son los valores del MDVA obtenidos en este trabajo para los cuales se encontró coincidencia para la curva de variación secular SCHA.DIF.14K (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014). Los puntos en rojo son los datos obtenidos en este trabajo para los cuales no se encontró correspondencia alguna con los modelos globales; se utilizan los periodos cerámicos para poder darles una marco temporal. Los valores de este tipo asociados a los sitios *SG* y *PG* tienen una fuerte coincidencia con los presentados por Soler-Arechalde (2014).

posible dar una ubicación temporal para etapas constructivas tan cercanas entre ellas por medio del método de arqueointensidad considerando: 1) la mineralogía magnética de los materiales estudiados, y 2) las curvas de variación secular existentes para el centro de México son aún poco fiables en marcos cronológicos tan cerrados (< 50 años). Algo similar sucede con las cerámicas del sitio de *LJ* en las que se tenían dos dataciones de ^{14}C parcialmente coincidentes. En este caso fue posible distinguir las dos etapas constructivas (III A inferior y III A superior en Daneels *et al.* (2013)) sin minimizar el hecho que las dataciones tuvieron coincidencias debido a que el cálculo se realiza por medio de una distribución de probabilidad bivariada. De estas dataciones podemos observar que a pesar de que las edades por ^{14}C sin calibrar tienen una diferencia en su media de 10 años, los materiales utilizados se pueden considerar cerca de lo ideal en función de las hipótesis del método de Thellier-Coe.

Se da una relevancia a las dataciones obtenidas en los sitios *Tul* y *LJ*, debido no sólo al comportamiento de las curvas κ vs T , a los

valores de f , g y q obtenidos en el análisis de las gráficas de Arai o a su coincidencia con las dataciones por ^{14}C , sino también por los valores de la susceptibilidad dependiente de las frecuencias $\overline{\chi_{df}}\% = 6.23\%$ y $\overline{\chi_{df}}\% = 5.17\%$ respectivamente, los cuales se agrupan entre 5 y 7%, coincidentemente en un intervalo muy parecido al reportado por Pétronille *et al.* (2012) cuyos valores de susceptibilidad se agrupan $5\% < \chi_{df}\% < 6\%$ con un mínimo de 1.1% y un máximo de 10.7%. Estos autores relacionan esta agrupación con un buen comportamiento de las muestras durante el proceso de arqueointensidad, como también a las propiedades mineralógicas de los materiales cerámicos. Para los sitios *Tul* y *LJ*, se tuvieron valores $\overline{\chi_{df}}\%_{Tul} = 6.23$ y $\overline{\chi_{df}}\%_{LJ} = 5.17$. El valor $\overline{\chi_{df}}\%_{Tul} > \overline{\chi_{df}}\%_{LJ}$ corresponde correctamente en la gráfica de Day de la Figura 5.4, ya que la agrupación de los datos para el sitio de *LJ* tienden a una menor concentración de granos SP, acercándose a las curvas de mezcla DS+MD a diferencia de los datos para el sitio *Tul*, cuya agrupación presenta una concentración 3% mayor que la del sitio *LJ*. Los valores $\overline{\chi_{df}}\%_{SG} = 16.1$ y $\overline{\chi_{df}}\%_{PG} = 14.93$ son muy altos de acuerdo a Dearing (1999) por lo que no es posible asegurar algo acerca de la concentración de granos SP y su mezcla con DS.

5.1. Conclusiones

Se estudiaron materiales arqueológicos (cerámicas y bajareques quemados) de cuatro sitios en el Centro de México (sitios de San Gregorio Atlapulco y Tulyehualco en Xochimilco y Plaza Gamio en el Templo Mayor dentro de la cuenca de México y La Joya en Veracruz) obteniendo las intensidades del campo geomagnético por arqueointensidad con el método de Thellier-Coe. A partir de éstas, se calcularon edades que están distribuidas discretamente entre 700 aC y 1500 dC incrementando en un 4% la densidad de los datos de la curva de variación secular para el Centro de México. Estos datos cubren parcialmente dos zonas de esta curva (de 1400 a 1000 aC y de 300 a 500 dC), donde particularmente hace falta información. Durante el análisis de las muestras se realizaron experimentos de la dependencia de la susceptibilidad con la frecuencia, luego de calentar las muestras a diferentes temperaturas. Esta dependencia ayudó a determinar la fiabilidad de las intensidades del campo para cada muestra obtenidas por medio de la

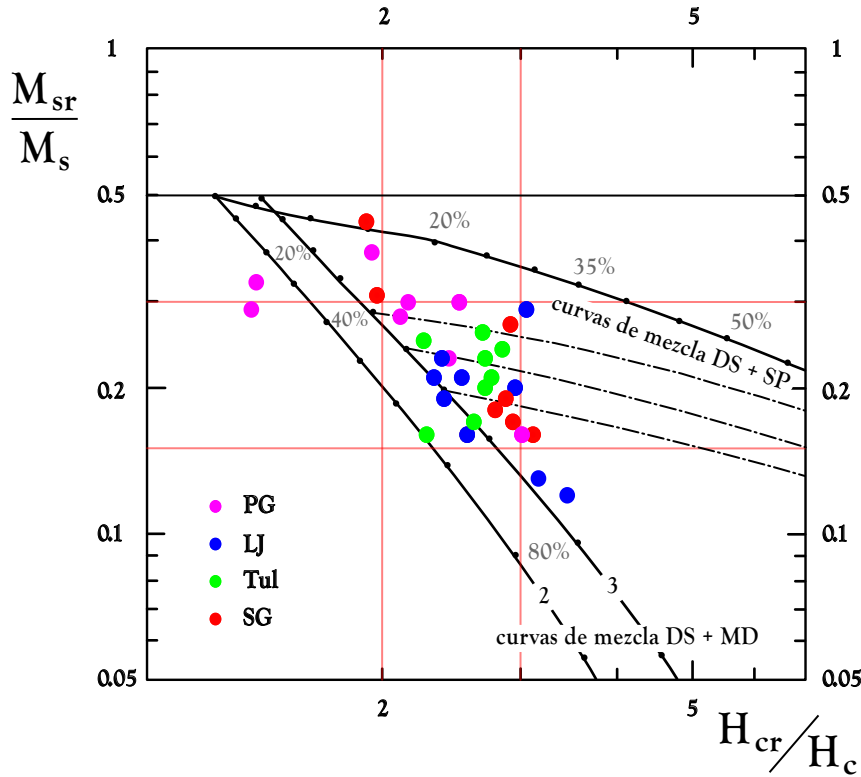


Figura 5.4: Diagrama de Day en donde se presentan los datos correspondientes a todos los sitios analizados en este trabajo. Se comparan con las curvas de mezcla de DS+MD (2 y 3) y las curvas de mezcla DS+SP de Dunlop (2002b).

gráfica de Arai, debido a que los mejores resultados para los parámetros del ajuste sobre esta gráfica se obtienen cuando χ_{df} % se agrupa entre el 5 % y el 7 % estando estos valores asociados a la presencia de mezclas de partículas SP y no SP. Además es posible identificar, de los ciclos de histéresis para todos los sitios, la presencia predominante de dominios pseudo-sencillos, siendo los portadores de la remanencia principalmente titanomagnetitas pobres en titanio, en algunos casos coexistiendo con componentes ricas en titanio. Los sitios de Tulyehualco y La Joya presentaron valores agrupados en este intervalo de χ_{df} %, siendo los dos sitios de donde se obtuvieron las mejores dataciones. Por lo tanto, se asocia la obtención de arqueointensidades con una alta confiabilidad para su datación al elegir muestras que posean tanto dominios pseudo-sencillos, como valores de χ_{df} % agrupados en este intervalo.

De las morfologías en las curvas de susceptibilidad a altas temperaturas

se identificaron comportamientos magnetomineralógicos asociados a la viabilidad de las cerámicas, encontrando una relación con las gráficas de Arai que produjeron los mejores resultados. Algunas de estas curvas presentan de dos a tres componentes mineralógicas de bajas temperaturas de Curie, provocando que las curvas de susceptibilidad a alta temperatura presenten la forma de una *pinza* abierta y por lo tanto no se pueda realizar un análisis de sus gráficas de Arai ya que existen transformaciones mineralógicas durante el método de Thellier-Coe. Ésta morfología en particular esta asociada a la coexistencia de titanomagnetitas pobres en titanio con una o mas fases de titanomagnetita rica en titanio.

Se analizaron también dos piezas que sufrieron recalentamientos. Un comal del sitio de San Gregorio Atlapulco en Xochimilco y un incensario del sitio de La Joya en Veracruz. De estas dos piezas se obtuvieron especímenes del borde y cuerpo con el fin de comprobar la viabilidad del método de arqueointensidad en estas zonas de las cerámicas. A partir de un lavado termomagnético es posible identificar dos componentes en el diagrama de Zijderveld determinando la temperatura de recalentamiento. En ambas piezas esta temperatura oscila entre los 280°C y los 310°C . A partir de este tipo de análisis es posible establecer, si el tiesto pertenecía a una cerámica cuyo uso estuviese relacionado con la preparación de alimentos o a un uso ceremonial empleando fuego. Al observar el diagrama de Zijderveld de una muestra del sitio de San Gregorio Atlapulco, se concluyó que pertenecía a una pieza de uso doméstico para la preparación de alimentos, debido a que presentó dos componentes direccionales. La temperatura en donde se da la inflexión entre estas dos componentes, se encuentra dentro del intervalo de temperaturas reconocido para las piezas cuyo uso es determinado por su tipología cerámica.

Los sitios de San Gregorio y Plaza Gamio presentaron bajos porcentajes de éxito con respecto al número de muestras analizadas (entre el 14 y 25 %), así como una gran dispersión en los valores respectivos de las intensidades y MVDA. A diferencia del sitio de La Joya y Tulyehualco con un porcentaje de éxito del 44 y 40 % respectivamente con una baja dispersión. Esto a pesar de que La Joya está localizada en una zona con altas precipitaciones presentes casi durante todo el año, lo que implicaría una gran alteración de la mineralogía magnética.

Las intensidades obtenidas de todos los sitios tienen una buena coincidencia con la curva SCHA.DIF.14K, al reducir la ventana temporal para la datación alrededor del periodo arqueológico aproximado por medio de la fase cerámica. El éxito en las dataciones por medio del método

de arqueointensidad está restringido por la mineralogía y las propiedades magnéticas registradas. Los sitios de La Joya en Veracruz y Plaza Gamio en el Templo Mayor son un ejemplo de ello. De ambos sitios se analizaron la misma cantidad de muestras, sin embargo del primer sitio se obtuvo un porcentaje de éxito mayor que del segundo sitio.

Además, es claro que no es posible distinguir por medio del método de arqueointensidad, diferentes eventos arqueológicos que estén en el orden de una década como es el caso de las cerámicas de Plaza Gamio, cuyas fases constructivas IV, V y VI del Templo Mayor, están separadas por menos de diez años. Esto se debe a que las curvas de variación secular no tienen la suficiente precisión para llevar a cabo dataciones con eventos dentro de ventanas tan reducidas. Sin embargo, es posible hacer distinciones entre dos o más dataciones que se traslapen, correlacionando las edades obtenidas por arqueointensidad con los eventos arqueológicos relacionados. Un ejemplo de ello son las dataciones del sitio de La Joya en donde fue posible concluir, de la diferencia de edades entre una cerámica y el bajareque quemado de la fase constructiva IIIA inferior, que la cerámica tuvo su confección dentro del período de tiempo que duró la fase mientras que el bajareque fue quemado al final del período al considerar las dataciones a 1σ .

Finalmente, el progreso que se ha obtenido en la construcción de la curva de variación secular para el Centro de México a partir del año 2000, en comparación con la construcción de estas curvas en otros países, refleja la necesidad de incrementar la colaboración interdisciplinaria entre arqueólogos y especialistas en arqueomagnetismo. Las curvas de variación secular son, además de una herramienta de datación, claves para entender el funcionamiento del campo geomagnético terrestre. Es por ello que la obtención de un mayor volumen de materiales, tanto arqueológicos como geológicos de distintas temporalidades y localidades, proveerá de una considerable densidad de información para la confección de la curva de variación secular, no solo para el Centro de México, sino para todo el territorio mexicano.

Apéndice A

Tablas de resultados y gráficas de κ vs T

En las Tablas A.1, A.2, A.3 y A.4 se presenta un resumen de los resultados del análisis de arqueointensidad para los cuatro sitios. N el número de puntos utilizados para los ajustes de la recta en la gráfica de Arai. T temperaturas mínima y máxima entre las cuales se realizó este ajuste. f , g y q , los coeficientes descritos por Coe *et al.* (1978) y la máxima desviación angular (MAD por sus siglas en ingles) anclada al origen. $\delta(Ck)$ y $DRAT$ parámetros que proporcionan una medida relativa de la desviación que puede llegar a tener el control cTRMp con respecto a la TRMp medida en cada una de las muestras a una temperatura específica (Leonhardt *et al.*, 2004). f_{RE} el factor de corrección por rapidez de enfriamiento, que se obtuvo para cada uno de los especímenes. H y H_{RE} los campos calculados sin y con corrección por rapidez de enfriamiento. $MDVA$ el valor del momento dipolar virtual axial calculado para cada muestra. Los valores de los campo H^* y H_{RE}^* corresponden a los que cumplieron con los criterios completos de la sección 4.3. Los valores de intensidad sin H y H_{RE} (sin *) corresponden a los que cumplieron con todos excepto con los límites establecidos para δ_{CK} y DRAT.

En la Tabla A.5 se presenta un resumen de los resultados de los experimentos para obtener el ciclo de histéresis y sus valores característicos (ver Sección 2.1.2). En la Tabla A.6 se presentan los espectros de T_C para cada una de las muestras haciendo una aproximación al portador de la magnetización.

Las Figuras A.1, A.2, A.3 y A.4 muestran todas las curvas del experimento de κ vs T y las termomagnéticas.

Tabla A.1: Resumen de los resultados del análisis de las gráficas de Arai para las muestras del sitio *SG*. La arqueointensidad del espécimen AR1184-1 se calculó usando la corrección de Valet *et al.* (1996) por lo que los parámetros $\delta(CK)$ y DRAT no aparecen en la tabla.

Esp.	N	T($^{\circ}C$)	f	g	q	MAD	δ_{CK}	DRAT	$H(\mu T)$	f_{RE}	$H_f(\mu T)$	VADM
117-1	12	0-520	1	0.65	13.3	2.7	19.6	11.7	54.5(2.7)	1.269	42.9(0.06)	9.65(0.01)
117-2	14	0-520	0.97	0.77	5.5	3	17.8	13.5	36.6(5)	1.195	30.64(0.16)	6.89(0.04)
117-3	14	0-520	0.98	0.79	6.1	5.1	21.5	17.1	32.3(4.1)	1.252	25.81(0.16)	5.8(0.04)
117-4	14	0-520	1	0.79	10.8	3.1	23.2	17	37(2.7)	1.195	30.95(0.09)	6.96(0.02)
117-5	14	0-520	0.96	0.79	17.2	1.7	24.6	17.9	40.8(1.8)	1.29	31.6(0.06)	7.11(0.01)
117-6	14	0-520	1	0.81	11.7	3.8	26.1	20.4	32.2(2.2)	1.26	25.58(0.09)	5.75(0.02)
117-7	8	0-340	0.78	0.73	11	2.9	2.3	2.2	34.4(1.8)*	1.242	27.69(0.06)*	6.23(0.01)*
117-8	13	70-520	0.99	0.76	11.6	2.2	52.6	38.5	37.9(2.4)	1.221	30.99(0.08)	6.97(0.02)
										Prom.	30.8(2.4)	6.92(0.41)
										Prom.*	27.7(0.1)	6.23(0.01)
1184-1	7	0-310	0.38	0.8	18.6	3.8	-	-	38.3(0.6)*	(0.98)	38.3(0.02)*	8.61(0)*
1184-2	14	0-520	0.92	0.88	11	10.7	14.9	12.3	45.7(3.6)	(0.965)	45.66(0.08)	10.27(0.02)
1184-3	9	280-520	0.67	0.81	13.3	1.8	8.9	9	42.7(1.8)*	(0.959)	42.71(0.04)*	9.61(0.01)*
1184-4	8	310-520	0.63	0.82	13.3	1.4	12.5	12.3	50.3(2)	(0.982)	50.28(0.04)	11.31(0.01)
1184-5	8	310-520	0.61	0.83	10.1	1.1	9.6	10.5	44.3(2.2)*	(0.976)	44.31(0.05)*	9.97(0.01)*
1184-7	8	310-520	0.59	0.8	11.4	11.1	16.3	19.9	39(1.6)	(0.969)	38.98(0.04)	8.77(0.01)
1184-8	8	310-520	0.61	0.77	17.8	3.9	24.3	26.7	44.2(1.2)	(0.973)	44.17(0.03)	9.93(0.01)
										Prom.	43.5(1.4)	9.78(0.32)
										Prom.*	41.8(1.5)	9.39(0.33)
1193-1	13	0-490	0.71	0.87	6.6	5.7	27.5	28.8	36(3.3)	1.068	33.69(0.1)	7.58(0.02)
1193-2	13	0-490	0.72	0.89	7.2	2.7	34.8	33.5	41.6(3.7)	1.054	39.44(0.09)	8.87(0.02)
1193-4	13	0-490	0.71	0.83	8.1	3.7	23.1	22.7	40.9(3)	1.004	40.72(0.07)	9.16(0.02)
1193-5	14	0-520	0.96	0.81	8.2	2.6	16	11.4	42.4(4)	1.065	39.85(0.1)	8.96(0.02)
1193-6	13	0-490	0.8	0.79	5.2	3.1	26.9	23.4	41.5(5)	1.076	38.52(0.13)	8.66(0.03)
1193-7	11	180-520	0.96	0.79	6.6	3.2	17.1	13.1	36.8(4.2)	1.112	33.07(0.13)	7.44(0.03)
1193-8	10	180-490	0.6	0.83	3.6	3.7	14.4	16.4	42.7(6)	1.006	42.44(0.14)	9.54(0.03)
										Prom.	38.2(1.2)	8.6(0.28)
										Prom.*	n/d	n/d
1203-1	17	0-520	0.93	0.9	14.7	5.4	14	9.2	51.2(2.9)	(0.995)	51.15(0.06)	11.5(0.01)
1203-6	8	310-520	0.6	0.71	5.7	4.8	11.1	11.4	51.7(3.9)	1.04	49.68(0.08)	11.17(0.02)
1203-7	10	255-520	0.7	0.76	19.3	3.9	14	12	52.6(1.5)	1.054	49.88(0.03)	11.22(0.01)
										Prom.	50.2(0.4)	11.3(0.08)
										Prom.*	n/d	n/d
1205-5	8	310-520	0.55	0.55	3.3	3.7	17.5	27.3	24.7(2.3)	1.128	21.9(0.11)	4.93(0.02)
1205-7	8	310-520	0.56	0.58	4.6	3.2	13.8	19.3	31.2(2.2)	1.163	26.84(0.08)	6.04(0.02)
										Prom.	24.4(1.7)	5.48(0.39)
										Prom.*	n/d	n/d
1216-1	14	0-520	0.84	0.88	6.9	2.9	18.7	15.5	41.6(4.5)	(0.988)	41.61(0.11)	9.36(0.02)
1216-2	12	0-460	0.47	0.83	4.3	2.7	12.7	20.6	33.2(3.1)	1.102	30.15(0.1)	6.78(0.02)
1216-7	14	0-520	0.77	0.66	7.7	2.4	13.6	13.2	36.1(2.4)	(0.961)	36.13(0.07)	8.13(0.01)
1216-8	14	0-520	0.76	0.81	7.2	3.3	13.2	13	34.6(3)	1.066	32.43(0.09)	7.29(0.02)
										Prom.	35.1(2.2)	7.89(0.49)
										Prom.*	n/d	n/d
1225-1	11	180-520	0.55	0.77	3.6	9.2	11.1	14	41.9(4.9)	(0.784)	41.85(0.12)	9.41(0.03)
1225-2	12	130-520	0.72	0.83	5.9	5.7	13	12.9	38.7(3.9)	1.013	38.19(0.1)	8.59(0.02)
1225-5	11	180-520	0.65	0.85	4.3	5.6	13.2	14.5	38.2(4.9)	(0.72)	38.21(0.13)	8.59(0.03)
1225-6	10	230-520	0.56	0.83	3.2	9.2	15.6	19.8	39.1(5.8)	(0.922)	39.05(0.15)	8.78(0.03)
1225-7	10	230-520	0.52	0.8	3	8.7	15.8	20.6	43.6(6.2)	(0.932)	43.6(0.14)	9.81(0.03)
										Prom.	40.2(1)	9.04(0.23)
										Prom.*	n/d	n/d

Tabla A.2: Resumen de los resultados del análisis de las gráficas de Arai para las muestras del sitio *Tul*.

Esp.	N	T(°C)	f	g	q	MAD	δ_{CK}	DRAT	$H(\mu T)$	f_{RE}	$H_f(\mu T)$	VADM
107-7	11	230-550	0.96	0.82	5.8	6.2	10.7	10.8	35.9(1.4)	(0.944)	35.9(1.4)	8.06(0.31)
107-8	11	230-550	0.94	0.83	6.5	4.7	9	9.2	35.5(1.5)*	(0.947)	35.5(1.5)*	7.97(0.33)*
										Prom.*	35.7(0.1)	8.02(0.03)
										Prom.*	35.5(1.5)	7.97(0.33)
112-1	12	180-550	0.94	0.81	5.5	10.2	17.2	17.8	31.1(1.1)	(0.837)	31.1(1.1)	6.99(0.25)
112-2	12	180-550	0.93	0.78	6.1	7.6	18.9	19.7	40.6(1.2)	(0.992)	40.6(1.2)	9.12(0.26)
112-3	9	310-550	0.83	0.76	7.2	5.5	13.7	16.3	30.1(0.6)	(0.884)	30.1(0.6)	6.77(0.13)
112-4	7	370-550	0.73	0.77	6.2	11.6	14	19	41.9(0.5)	1.081	38.8(0.5)	8.73(0.11)
112-5	12	180-550	0.94	0.57	3.7	8.9	34.1	35.1	35(1.4)	1.034	33.8(1.4)	7.61(0.31)
112-7	12	180-550	0.87	0.75	5.1	5.3	23.6	26.8	36.2(0.9)	1.021	35.5(0.9)	7.97(0.2)
112-8	12	180-550	0.88	0.73	5.1	8.1	26.5	29.6	34.7(0.9)	(0.967)	34.7(0.9)	7.81(0.2)
										Prom.*	34.9(1.3)	7.86(0.3)
										Prom.*	n/d	n/d
113-1	9	70-400	0.42	0.72	3.5	2.2	5.2	9.1	37.7(3.3)*	1.025	36.8(3.2)*	8.27(0.72)*
113-3	7	280-460	0.42	0.74	3.2	1.7	7.2	12.4	38.7(3.7)*	(0.995)	38.7(3.7)*	8.7(0.83)*
113-4	12	70-490	0.6	0.86	3.3	1.5	17	20.2	39.1(6.1)	1.004	39(6)	8.77(1.36)
113-5	10	130-460	0.53	0.85	7.5	1.9	9.7	13.5	37.2(2.2)*	1.077	34.5(2.1)*	7.75(0.47)*
113-6	9	180-460	0.53	0.77	4.6	1.8	9.3	12.1	41.9(3.8)*	(0.99)	41.9(3.8)*	9.42(0.84)*
113-7	10	130-460	0.6	0.82	7.5	1.8	10.7	12.7	39.2(2.6)	1.047	37.4(2.5)	8.41(0.56)
113-8	10	130-460	0.66	0.76	9.7	1.4	12.3	12.5	44(2.3)	1.087	40.5(2.1)	9.1(0.47)
										Prom.*	38.4(0.9)	8.63(0.19)
										Prom.*	38(1.4)	8.54(0.31)
114-1	13	130-550	0.73	0.57	3.9	11	15.4	20.4	10.6(1.1)	(0.994)	10.6(1.1)	2.39(0.25)
114-2	13	130-550	0.77	0.72	6.4	5.8	9.9	12.3	13(1.1)*	1.003	13(1.1)*	2.91(0.25)*
114-3	7	370-550	0.57	0.7	5.9	6.4	9	15.2	10.8(0.7)	(0.998)	10.8(0.7)	2.43(0.16)
114-4	13	130-550	0.75	0.79	5.4	7.6	9	11.3	13.1(1.4)*	1.021	12.8(1.4)*	2.89(0.32)*
114-5	14	70-550	0.78	0.78	7.7	4.8	12.1	14.6	14.6(1.2)	(0.984)	14.6(1.2)	3.27(0.26)
114-6	9	310-550	0.7	0.69	5.4	3.7	13	17.8	10.5(1)	1.055	10(0.9)	2.24(0.2)
114-7	12	180-550	0.8	0.74	4.2	7.7	15	18	11.7(1.7)	(0.984)	11.7(1.7)	2.62(0.37)
114-8	11	230-550	0.74	0.76	5.1	4.2	17.3	22.3	12(1.3)	(0.954)	12(1.3)	2.71(0.3)
										Prom.*	11.9(0.5)	2.68(0.11)
										Prom.*	12.9(0)	2.9(0.01)
115-2	9	310-550	0.7	0.63	5.2	2.9	5.6	7.4	37.4(1.3)*	1.031	36.3(1.3)*	8.16(0.29)*
115-3	9	310-550	0.71	0.63	5.4	3.4	36	47.8	37.8(1.2)	1.014	37.3(1.2)	8.38(0.27)
115-7	9	310-550	0.76	0.52	3.8	2.9	36.9	44.1	48.7(1.9)	1.014	48(1.8)	10.8(0.41)
										Prom.*	40.5(3.1)	9.11(0.69)
										Prom.*	36.3(1.2)	8.16(0.29)

Tabla A.3: Resumen de los resultados del análisis de las gráficas de Arai para las muestras del sitio *LJ*. La arqueointensidad del espécimen AR103 se calculó usando la corrección de Valet *et al.* (1996) por lo que los parámetros $\delta(CK)$ y DRAT no aparecen en la tabla.

Esp.	N	T(°C)	f	g	q	MAD	δ_{CK}	DRAT	$H(\mu T)$	f_{RE}	$H_f(\mu T)$	VADM
98-6	11	230-550	0.6	0.72	3.5	5.2	7.8		40.8(5)*	(0.976)	40.82(0.12)*	9.18(0.03)*
98-7	10	230-520	0.63	0.71	4.7	3.4	8.8	9.2	45.6(4.3)*	(0.963)	45.57(0.09)*	10.25(0.02)*
98-8	10	280-550	0.72	0.73	4.2	5.7	13.5	13.7	36.9(4.7)	(0.959)	36.86(0.13)	8.29(0.03)
									Prom.*		41.1(2.1)	9.24(0.46)
									Prom.*		43.2(1.7)	9.71(0.38)
99-1	9	200-510	0.79	0.54	5	1.1	5.3	3.8	59.6(1)*	(0.966)	59.6(0.08)*	13.4(0.02)*
									Prom.*		59.6(0.1)	13.4(0.02)
									Prom.*		59.6(0.1)	13.4(0.02)
100-1	9	310-550	0.74	0.74	4.2	5	8.5	8.7	34.3(4.5)*	(0.957)	34.29(0.13)*	7.71(0.03)*
100-2	8	340-550	0.74	0.76	5.5	3.3	10.7	10.4	38.8(3.9)	(0.98)	38.76(0.1)	8.72(0.02)
100-3	8	340-550	0.71	0.74	8	4.9	6.2	6.8	32.4(2.1)*	(0.965)	32.36(0.07)*	7.28(0.01)*
100-4	8	340-550	0.68	0.78	5.5	3	8.2	9.3	33.1(3.2)*	(0.962)	33.12(0.1)*	7.45(0.02)*
100-5	8	340-550	0.68	0.76	11.2	4.1	8.6	10	31.2(1.4)*	1.016	30.68(0.05)*	6.9(0.01)*
100-7	7	340-520	0.56	0.61	4.5	4.2	7.7	9.5	42.5(3.2)*	(0.992)	42.51(0.08)*	9.56(0.02)*
									Prom.*		35.3(1.7)	7.94(0.37)
									Prom.*		34.6(1.8)	7.78(0.42)
101-1	9	200-510	0.79	0.69	12.1	1.7	1.6	1.1	62(2.8)*	(0.992)	61.98(0.05)*	13.94(0.01)*
101-2	9	200-510	0.79	0.68	6.3	1.1	9.4	6.9	55.8(4.8)*	1.007	55.41(0.09)*	12.46(0.02)*
101-3	9	200-510	0.76	0.77	5.4	1.3	6.4	4.6	59.8(6.5)*	1.027	58.29(0.11)*	13.11(0.03)*
101-4	9	200-510	0.8	0.69	21.6	1.2	1.1	0.8	58.6(1.5)*	(0.961)	58.59(0.03)*	13.18(0.01)*
101-5	9	200-510	0.75	0.78	7.7	1.1	1.3	1	53.8(4.1)*	(0.97)	53.77(0.08)*	12.09(0.02)*
101-6	9	200-510	0.74	0.8	6.2	1.3	3.2	2.6	53.8(5.1)*	(0.957)	53.79(0.1)*	12.1(0.02)*
101-7	9	200-510	0.67	0.81	3.5	1.4	9.3	9.6	42.1(6.5)*	(0.991)	42.14(0.15)*	9.48(0.03)*
									Prom.*		54.9(2.2)	12.34(0.5)
									Prom.*		54.9(2.2)	12.34(0.5)
103-1	15	0-550	0.91	0.9	21.9	2.6	-	-	49.2(1.8)	1.59	30.95(0.06)	6.96(0.01)
103-2	14	70-550	0.84	0.88	26.6	1.7	-	-	37.5(1.1)	1.491	25.13(0.04)	5.65(0.01)
103-3	14	70-550	0.87	0.82	11.6	5.5	-	-	53.1(3.3)	1.034	51.31(0.06)	11.54(0.01)
103-4	13	130-550	0.88	0.89	19.6	3.6	-	-	44.4(1.8)	(0.819)	44.38(0.04)	9.98(0.01)
103-5	7	370-550	0.66	0.8	8.6	4.2	-	-	30.3(1.9)	(0.804)	30.28(0.06)	6.81(0.01)
103-6	7	280-460	0.44	0.83	13.5	2.7	-	-	51.1(1.4)	1.174	43.56(0.03)	9.8(0.01)
									Prom.*		37.6(3.8)	8.46(0.86)
									Prom.*		n/d	n/d
104-2	11	100-525	0.76	0.77	6.2	4.9	11.8	9.7	50.1(4.7)	(0.991)	50.11(0.09)	11.27(0.02)
104-3	9	200-510	0.65	0.74	4	6.3	2.3	2.5	40.7(5)*	1.051	38.71(0.13)*	8.71(0.03)*
104-4	9	200-510	0.68	0.76	5.9	2.8	2.9	2.7	49(4.4)*	(0.99)	49.01(0.09)*	11.02(0.02)*
104-5	9	200-510	0.58	0.56	4.3	4.5	5.2	5.8	47.5(3.6)*	1.026	46.29(0.08)*	10.41(0.02)*
104-6	9	200-510	0.72	0.84	8.1	3.9	8.9	7.5	52.2(3.9)*	1.016	51.38(0.08)*	11.56(0.02)*
104-7	8	200-480	0.52	0.84	4.3	2.9	7.2	8.4	52.1(5.4)*	(0.977)	52.12(0.1)*	11.72(0.02)*
104-8	9	200-510	0.73	0.82	24	3.8	4.6	3.7	55.7(1.4)*	(0.934)	55.69(0.03)*	12.52(0.01)*
									Prom.*		49(1.9)	11.03(0.42)
									Prom.*		48.9(2.2)	10.99(0.49)
105-1	12	180-550	0.76	0.79	6.9	3.9	10.2	9.1	44.4(3.8)	(0.999)	44.37(0.09)	9.98(0.02)
105-2	12	180-550	0.65	0.78	6.3	2.9	53.8	62.4	34.5(2.8)	(0.995)	34.5(0.08)	7.76(0.02)
105-3	12	180-550	0.68	0.82	6.8	1.3	79.9	85.1	37.5(3.1)	1.138	32.98(0.09)	7.42(0.02)
105-4	15	0-550	0.66	0.8	7.2	3.5	9.6	10.5	38.3(2.8)*	(0.675)	38.33(0.07)*	8.62(0.02)*
105-5	12	180-550	0.69	0.77	6.2	1.6	11.7	12.3	38.5(3.3)	(0.999)	38.49(0.08)	8.66(0.02)
105-6	13	130-550	0.72	0.81	7.8	1.5	13.4	12.8	41.7(3.1)	(0.89)	41.71(0.08)	9.38(0.02)
105-7	15	0-550	0.73	0.8	8.5	3.4	17.5	15.6	46.4(3.2)	(0.999)	46.36(0.07)	10.43(0.02)
105-8	12	180-550	0.73	0.81	5.5	1.4	20	18	45.8(4.9)	1.017	44.98(0.11)	10.12(0.02)
									Prom.*		40.2(1.6)	9.04(0.37)
									Prom.*		38.3(0.1)	8.62(0.02)
106-1	9	200-510	0.73	0.75	3.2	1.7	17.4	14.2	54.3(9.3)	1.055	51.52(0.18)	11.59(0.04)
106-2	9	200-510	0.77	0.84	9.6	2.2	2.6	2.2	47.5(3.2)*	1.103	43.11(0.07)*	9.69(0.02)*
106-3	9	200-510	0.79	0.79	7.6	1.7	14.1	11	50.9(4.2)	1.062	47.87(0.09)	10.77(0.02)
106-4	9	200-510	0.68	0.72	5.2	22.9	5.5	5.1	49.7(4.6)*	1.031	48.21(0.1)*	10.84(0.02)*
106-5	9	200-510	0.81	0.84	8.1	32.7	7.5	6.1	45.8(3.9)*	1.071	42.72(0.09)*	9.61(0.02)*
106-6	9	200-510	0.73	0.86	9.1	1.8	5.3	5.1	40.7(2.8)*	1.076	37.81(0.07)*	8.5(0.02)*
106-7	9	200-510	0.76	0.83	9.5	2.8	3.4	3.2	39.7(2.7)*	1.035	38.35(0.07)*	8.62(0.02)*
106-8	9	200-510	0.72	0.81	5.7	4.2	1.9	1.9	39.2(4)*	1.088	36.04(0.11)*	8.1(0.02)*
									Prom.*		43.2(1.9)	9.72(0.42)
									Prom.*		41(1.7)	9.23(0.38)

Tabla A.4: Resumen de los resultados del análisis de las gráficas de Arai para las muestras del sitio *PG*. La arqueointensidad del espécimen AR91-3,4,6, y 94-1,2 se calculó usando la corrección de Valet *et al.* (1996) por lo que los parámetros $\delta(CK)$ y DRAT no aparecen en la tabla.

Esp.	N	T(°C)	f	g	q	MAD	δ_{CK}	DRAT	$H(\mu T)$	f_{RE}	$H_f(\mu T)$	VADM
89-1	11	70-490	0.87	0.78	9.2	19.2	6.6	7.2	12.1(0.9)*	1.2	10.08(0.09)*	2.27(0.2)*
89-2	12	70-490	0.9	0.67	9.4	17.6	10.8	10.9	18.3(1.2)	1.169	15.61(0.08)	3.51(0.27)
89-3	13	0-490	0.51	0.84	5.3	16.6	7.5	14.2	11.8(0.9)*	1.085	10.84(0.09)*	2.44(0.21)*
89-4	12	70-490	0.85	0.49	3.9	19.5	14	15.3	16.1(1.7)	1.078	14.97(0.11)	3.37(0.38)
89-5	11	130-490	0.72	0.76	4.4	27.7	8.7	11.6	10.9(1.4)*	1.098	9.96(0.14)*	2.24(0.31)*
										Prom.	12.3(1.1)	2.76(0.25)
										Prom.*	10.3(0.2)	2.31(0.05)
90-2	10	230-520	0.74	0.82	5.2	1.6	18.9	14.5	58.6(6.8)	1.162	50.38(0.14)	11.33(1.53)
90-3	14	0-520	0.86	0.87	10.9	1.4	17.8	13.8	44.8(3.1)	(0.996)	44.75(0.07)	10.06(0.69)
90-4	14	0-520	0.84	0.85	7.8	2.1	16.6	12.6	48(4.4)	1.11	43.28(0.1)	9.73(0.99)
90-5	14	0-520	0.85	0.87	9.3	1.5	21.9	16.6	47.9(3.8)	1.086	44.11(0.09)	9.92(0.86)
90-6	13	0-520	0.89	0.84	11.3	1.7	18.1	13	47.6(3.2)	(0)	47.59(0.07)	10.7(0.71)
90-8	12	0-460	0.65	0.84	8.1	1.8	12.3	12.2	47.6(3.2)	1.084	43.88(0.07)	9.87(0.72)
										Prom.	45.7(1)	10.27(0.23)
										Prom.*	n/d	n/d
91-1	14	0-520	0.91	0.87	12.8	2.6	25.6	19.9	40(2.5)	1.165	34.35(0.07)	7.72(0.56)
91-2	14	0-520	0.91	0.87	10.7	1.7	31.1	22.6	45.5(3.4)	1.142	39.86(0.08)	8.96(0.76)
91-3	7	0-310	0.44	0.69	5.6	1.2	-	-	44(2.4)	1.186	37.09(0.06)	8.34(0.54)
91-4	7	0-310	0.41	0.68	8.8	1.2	-	-	39.5(1.2)	1.23	32.1(0.04)	7.22(0.28)
91-4	7	340-520	0.47	0.79	4	2.4	15.2	27.1	25.5(2.4)	1.23	20.72(0.11)	4.66(0.54)
91-6	12	0-520	0.91	0.76	8.6	2.2	-	-	55.9(4.5)	1.21	46.15(0.1)	10.38(1.01)
91-7	13	0-520	0.91	0.87	12	3	6.1	4.2	49.7(3.3)*	1.14	43.56(0.08)*	9.8(0.74)*
91-8	12	0-490	0.87	0.8	13.5	2	13.1	9.6	48.3(2.5)	1.167	41.44(0.06)	9.32(0.56)
										Prom.	37.3(2)	8.3(0.6)
										Prom.*	41.4(2.5)	9.8(0.74)
92-1	8	280-490	0.46	0.83	3.5	9.3	9.1	13.4	44.2(4.9)*	1.205	36.66(0.13)*	8.25(1.09)*
92-2	13	0-490	0.83	0.9	10.1	12.1	22.7	21.3	32(2.4)	1.213	26.36(0.09)	5.93(0.54)
92-3	13	0-490	0.83	0.9	10.6	15	8.9	8.2	33.5(2.4)*	1.244	26.92(0.09)*	6.05(0.53)*
92-4	13	0-490	0.81	0.89	9.3	15.2	12.5	12.1	31.9(2.5)	(0.976)	31.91(0.08)	7.18(0.56)
92-5	12	70-490	0.74	0.88	7.9	16.6	7.3	7.7	31.3(2.6)*	1.142	27.39(0.09)*	6.16(0.58)*
92-6	13	0-490	0.83	0.87	15.7	16.1	7.4	6.9	32.3(1.5)*	1.106	29.21(0.05)*	6.57(0.34)*
92-7	13	0-490	0.81	0.85	5	15.5	29.3	27.8	33.3(4.6)	1.114	29.88(0.15)	6.72(1.02)
92-8	13	0-490	0.85	0.88	11.8	15.5	13.4	11.5	37.2(2.4)	1.075	34.6(0.07)	7.78(0.53)
										Prom.	30.4(1.2)	6.83(0.28)
										Prom.*	30(2)	6.76(0.44)
93-1	12	0-490	0.91	0.87	7	12.5	10.3	8.8	32.2(3.7)	1.008	31.94(0.11)	7.18(0.82)
93-3	11	130-490	0.69	0.87	4.3	9.1	10.6	11.5	35.3(4.9)	(0.992)	35.31(0.14)	7.94(1.11)
93-4	9	230-490	0.62	0.85	7.8	4.1	11.3	12.7	41.1(2.8)	(0.982)	41.12(0.07)	9.25(0.63)
93-5	10	180-490	0.68	0.87	6.5	4.2	8.5	8.9	39.2(3.6)*	1.007	38.91(0.09)*	8.75(0.81)*
93-6	9	230-490	0.62	0.85	7.6	4.4	7.4	8.2	42.5(2.9)*	(0.972)	42.5(0.07)*	9.56(0.66)*
93-7	7	310-490	0.51	0.83	5.3	9.8	9.4	14.8	30(2.4)*	1.018	29.51(0.08)*	6.64(0.54)*
93-8	11	130-490	0.73	0.88	4.3	12.6	8.7	9.5	30.7(4.5)*	1.039	29.55(0.15)*	6.65(1.02)*
										Prom.	35.5(1.9)	7.99(0.43)
										Prom.*	35.1(2.2)	7.9(0.64)
94-1	12	0-525	0.82	0.88	12.7	3.7	-	-	57.3(3.3)	1.002	57.19(0.06)	12.86(0.73)
94-2	12	0-525	0.74	0.86	3.4	3.9	-	-	52.1(9.7)	1.064	48.93(0.2)	11.01(2.18)
										Prom.	53.1(2.9)	11.93(0.66)
										Prom.*	n/d	n/d
96-1	12	70-520	0.99	0.86	11.7	8.9	9.5	6.3	46.4(3.3)*	n/d	46.4(0.07)*	10.44(0.75)*
96-2	14	0-520	0.97	0.87	16.8	9.2	16.2	11.8	40.3(2)	1.122	35.9(0.06)	8.07(0.45)
96-3	13	70-520	0.91	0.87	18.9	11.7	14.3	11.5	37.4(1.6)	1.241	30.13(0.05)	6.78(0.35)
96-4	14	0-520	0.95	0.66	5.2	13	58.1	42.2	41.9(5.1)	1.198	34.93(0.15)	7.86(1.14)
96-5	10	70-490	0.85	0.81	14.3	9.2	12.4	10.9	35.4(1.7)	n/d	35.35(0.05)	7.95(0.38)
96-7	6	70-310	0.32	0.77	3	4.6	-	-	30.7(2.5)	1.113	27.59(0.09)	6.21(0.57)
96-7	13	70-520	0.91	0.89	12.3	10.1	24.6	20.6	33.6(2.2)	1.113	30.13(0.07)	6.78(0.49)
96-8	13	70-520	0.99	0.86	13.4	8.1	22.3	17.5	32.9(2.1)	1.167	28.14(0.07)	6.33(0.47)
										Prom.	34.4(2.1)	7.55(0.46)
										Prom.*	46.4(3.3)	10.44(0.75)
97-1	9	200-510	0.72	0.77	9.1	7.6	1.9	1.6	53.2(3.3)*	1.06	50.19(0.06)*	11.29(0.73)*
97-2	7	200-510	0.65	0.33	3	8.4	12.3	11.1	54.7(3.8)	1.034	52.91(0.07)	11.9(0.86)
97-3	9	200-510	0.68	0.76	8.3	4	5.6	4.7	57.8(3.6)*	1.049	55.14(0.07)*	12.4(0.81)*
97-5	9	200-510	0.59	0.79	3.6	3.9	3.8	3.7	55.9(7.2)*	1.007	55.49(0.13)*	12.48(1.63)*
97-6	9	200-510	0.63	0.8	5.1	4.9	90.8	90.1	50.1(5)	1.074	46.65(0.11)	10.49(1.12)
97-7	10	100-510	0.5	0.81	3.9	8.9	9	11.8	45.1(4.8)*	1.012	44.54(0.11)*	10.02(1.07)*
										Prom.	50.8(1.7)	11.43(0.38)
										Prom.*	51.3(2.2)	11.55(0.5)

Tabla A.5: Resumen de los resultados del experimento de histéresis sobre las muestras de cada sitio.

	<i>Masa</i> (mg)	<i>Bcr</i> (mT)	<i>Mrs</i> ($\times 10^{-4} Am^2/kg$)	<i>Ms</i> ($\times 10^{-4} Am^2/kg$)	<i>Bc</i> (mT)	<i>Brh</i> (mT)	<i>Bcr/Bc</i>	<i>Mrs/Ms</i>	<i>Brh/Bcr</i>
Plaza Gamio	AR089	125	57.33	0.38	22.87	60.25	2.51	0.30	1.05
	AR90NR	-	-	-	-	-	-	-	-
	AR90R	167	48.38	0.41	20.00	58.28	2.42	0.23	1.20
	AR091	134	51.55	0.23	37.45	55.77	1.38	0.33	1.08
	AR092	297	39.12	1.10	20.11	44.67	1.94	0.38	1.14
	AR093	187	26.54	1.19	12.56	24.19	2.11	0.28	0.91
	AR094	186	42.36	0.33	19.65	50.58	2.16	0.30	1.19
	AR95	-	-	-	-	-	-	-	-
	AR096	165	44.69	0.32	32.92	54.89	1.36	0.29	1.23
	AR097	233	39.35	0.39	13.04	53.29	3.02	0.16	1.35
Tulyhualco	AR098	180	49.30	0.52	19.45	58.53	2.53	0.21	1.19
	AR099	242	37.12	0.33	11.70	59.04	3.17	0.13	1.59
	AR100	142	35.99	0.26	10.45	60.49	3.45	0.12	1.68
	AR101NR	223	35.38	1.14	13.76	53.46	2.57	0.16	1.51
	AR101R	266	41.15	0.40	17.15	52.25	2.40	0.23	1.27
	AR102	201	41.64	1.55	16.23	57.50	2.57	0.16	1.38
	AR103	208	37.19	2.31	12.16	413.38	3.06	0.29	11.12
	AR104	100	50.54	0.39	17.08	56.59	2.96	0.20	1.12
	AR105	132	40.10	1.09	16.68	55.22	2.40	0.19	1.38
	AR106NR	-	-	-	-	-	-	-	-
AR106R	253	33.52	1.35	14.41	47.42	2.33	0.21	1.41	
La Joya	AR107	164	25.35	0.29	9.68	41.00	2.62	0.17	1.62
	AR109	241	42.64	0.28	15.76	49.68	2.71	0.23	1.17
	AR110	185	56.80	0.17	21.11	63.25	2.69	0.26	1.11
	AR112	233	21.12	0.44	9.27	22.70	2.28	0.16	1.07
	AR113	142	45.30	0.08	15.91	55.17	2.85	0.24	1.22
	AR114	140	42.70	0.52	15.48	52.90	2.76	0.21	1.24
	AR115	170	30.95	0.57	13.68	39.01	2.26	0.25	1.26
	AR116	273	43.19	0.79	15.92	58.55	2.71	0.20	1.36
	AR117	150	46.54	0.15	23.57	54.70	1.97	0.31	1.18
	AR1184	181	72.86	0.63	38.23	73.85	1.91	0.44	1.01
San Gregorio	AR1193	278	39.63	0.26	14.22	54.53	2.79	0.18	1.38
	AR1203	142	41.82	0.21	14.50	50.83	2.88	0.19	1.22
	AR1205	262	42.92	0.17	14.58	54.20	2.94	0.17	1.26
	AR1216	262	44.10	0.35	14.15	61.52	3.12	0.16	1.40
	AR1225	219	41.08	0.28	14.07	29.88	2.92	0.27	0.73

Figura A.1: Curvas de κ vs T para el sitio SG indicando las T_C observadas por medio del análisis con el método de Tauxe (1998)

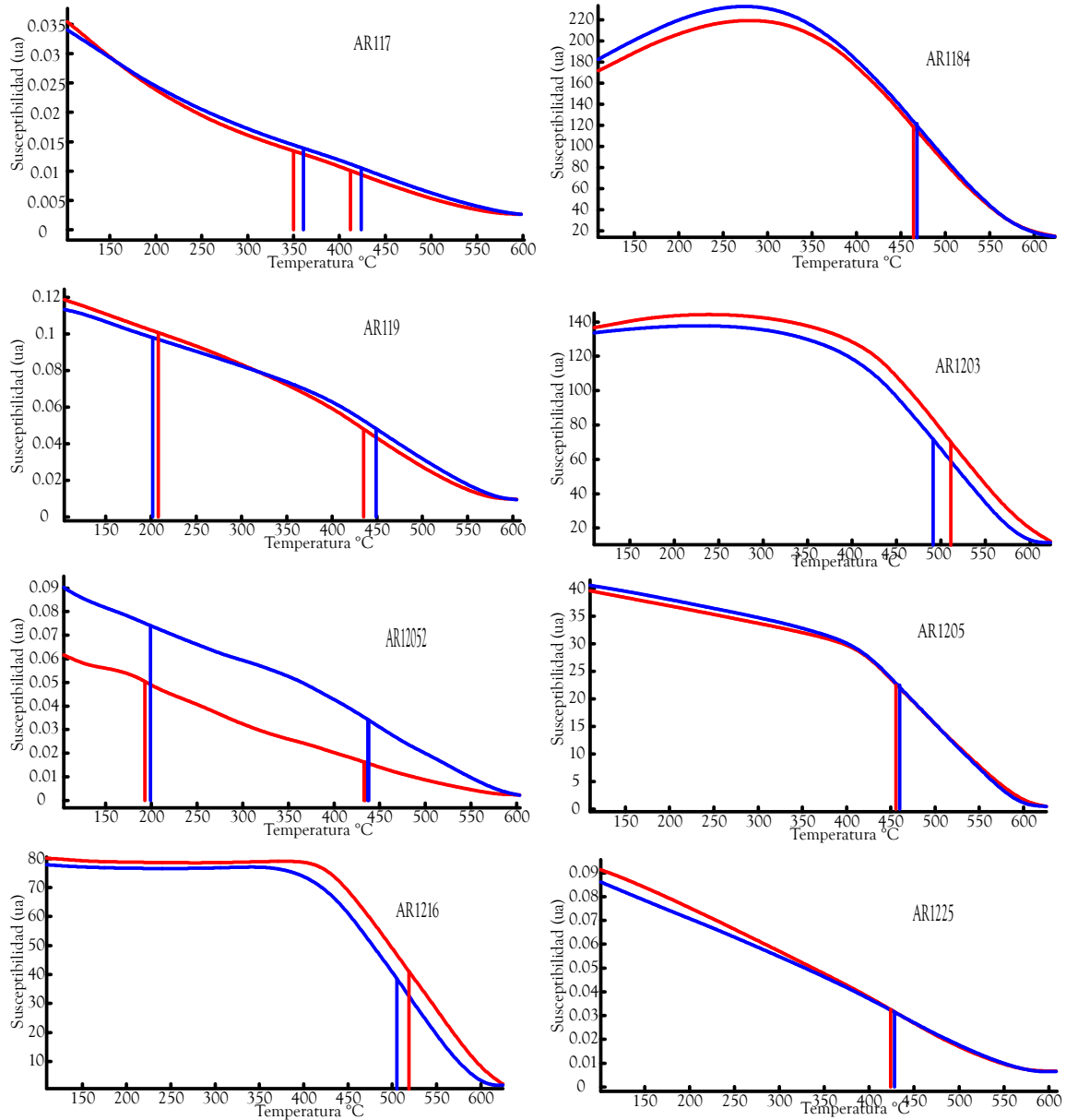


Figura A.2: Curvas de κ vs T para el sitio *Tul* indicando las T_C observadas por medio del análisis con el método de Tauxe (1998)

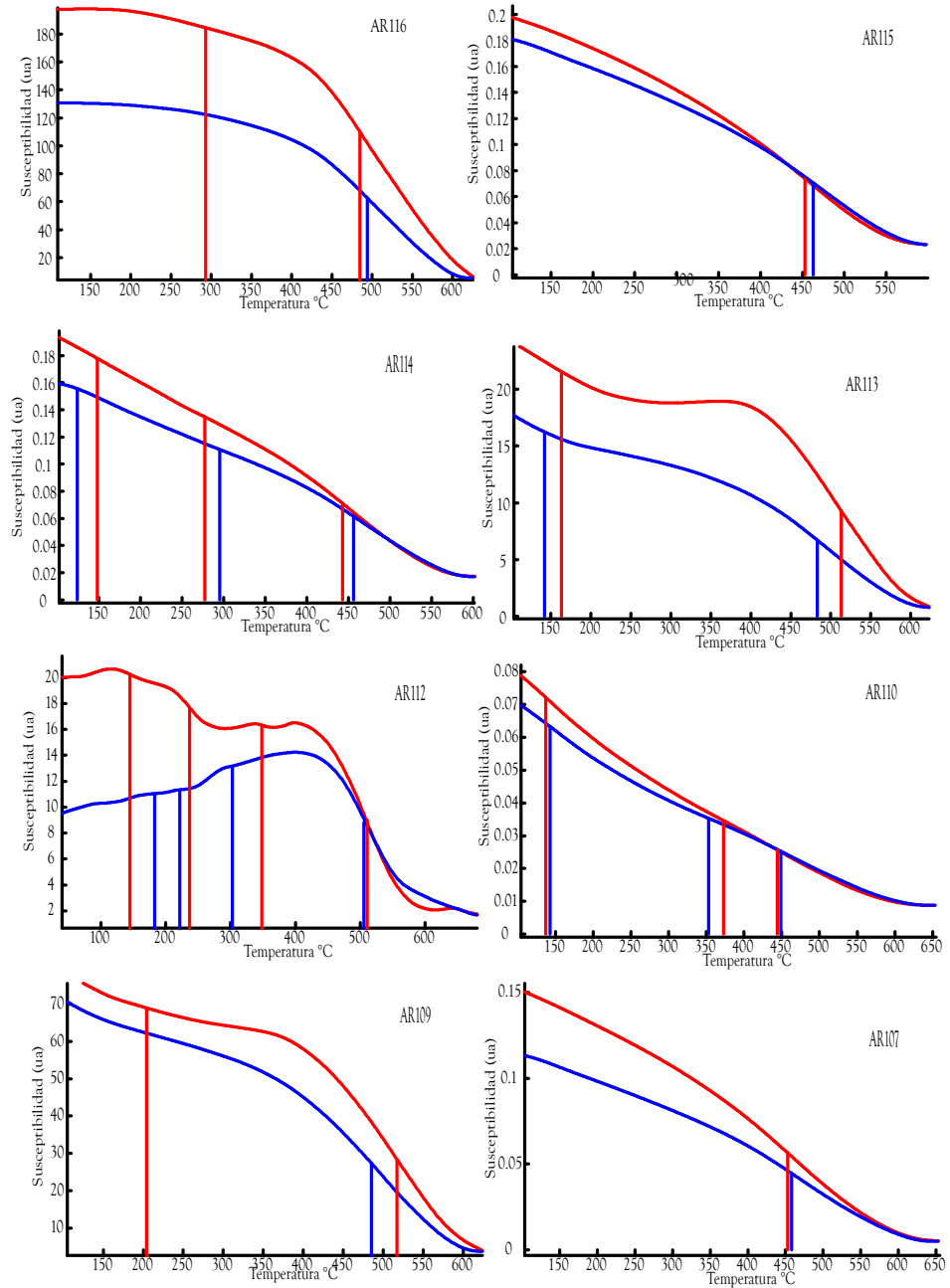


Figura A.3: Curvas de κ vs T para el sitio LJ indicando las T_C observadas por medio del analisis con el método de Tauxe (1998)

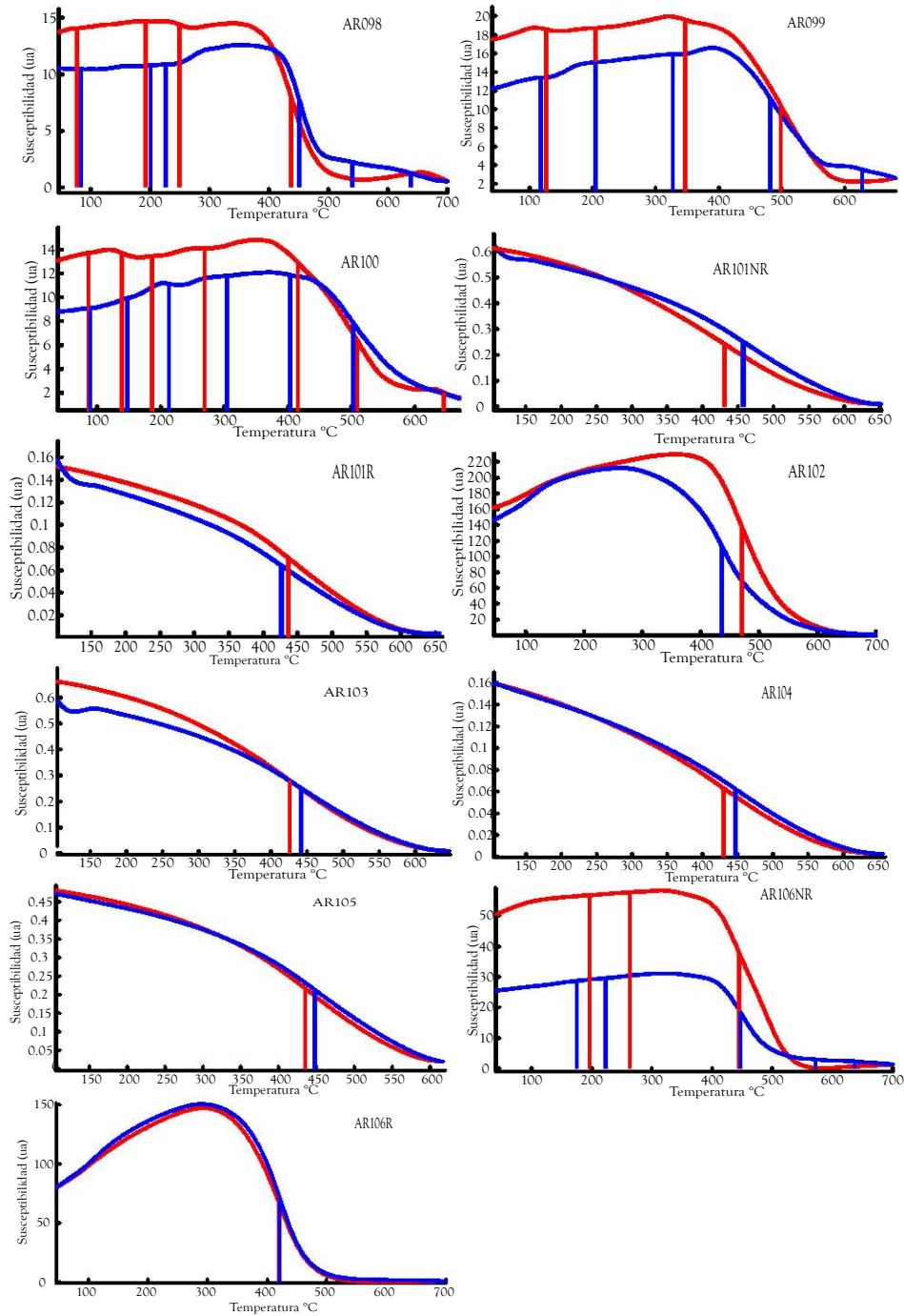
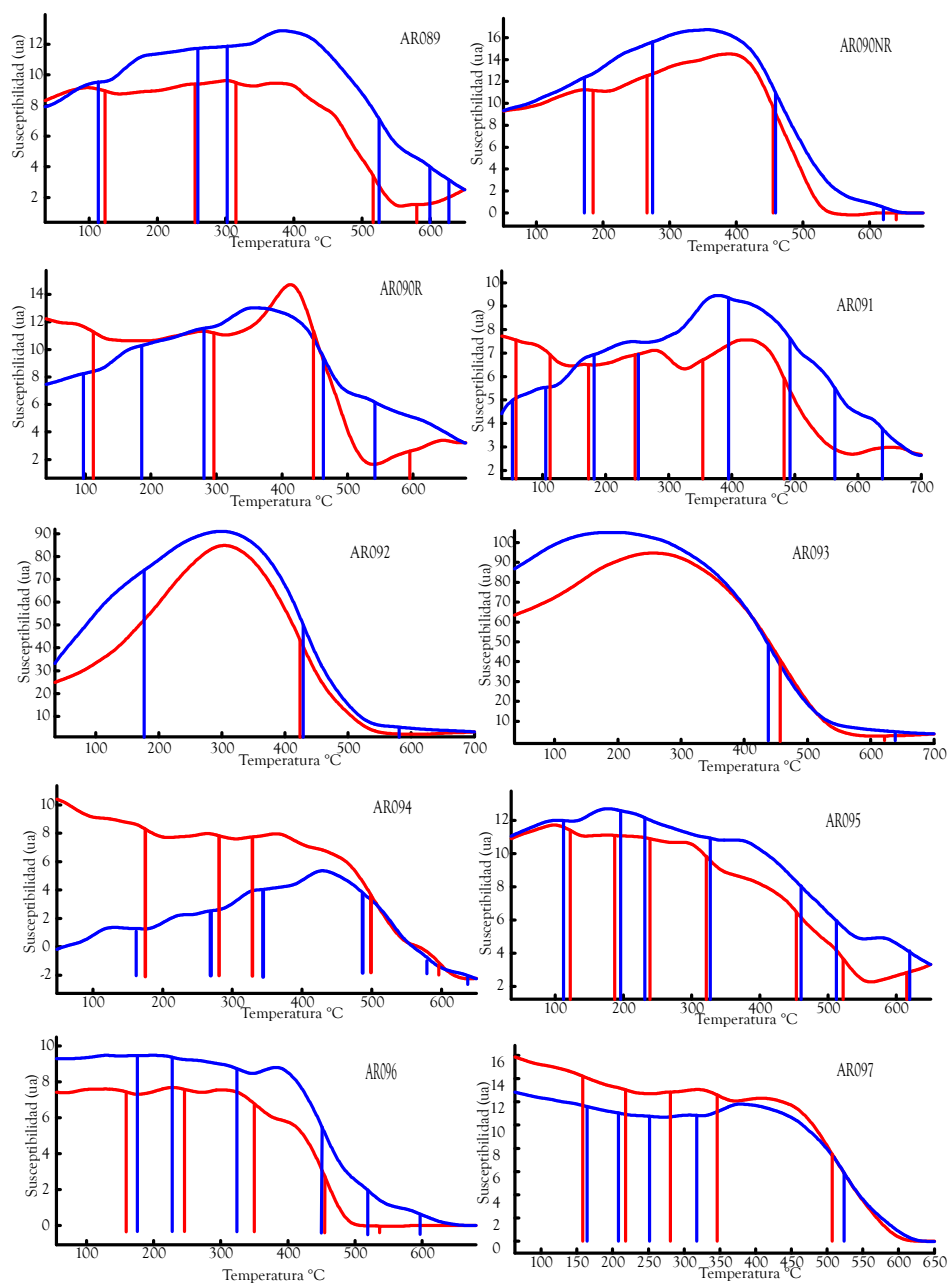


Figura A.4: Curvas de κ vs T para el sitio PG indicando las T_C observadas por medio del análisis con el método de Tauxe (1998)

Bibliografía

- ACOSTA OCHOA, GUILLERMO; PÉREZ MARÍNEZ, PATRICIA y ARROYO CABRALES, JOAQUÍN (2014). «Proyecto Poblamiento, Agricultura Inicial y Sociedades Aldeanas en la Cuenca de México». *Informe técnico*, Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM, Ciudad de México.
- ALKEN, P.; CHULLIAT, A; NAIR, M.; MEYER, B.; SALTUS, R.; WOODS, A. y BONEH, N. (2016). «New advances in geomagnetic field modeling». En: *Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy (ISCWSA) 44th meeting*, Glasgow, Escocia.
- ALVA-VALDIVIA, L. M.; MORALES, J.; GOGUITCHAICHVILI, A.; DE HATCH, M. POPENOE; HERNANDEZ-BERNAL, M. S. y MARIANO-MATÍAS, F. (2010). «Absolute geomagnetic intensity data from preclassic Guatemalan pottery». *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **180(1-2)**, pp. 41–51.
- ALVA-VALDIVIA, LUIS M.; RIVAS-SÁNCHEZ, MARÍA DE LA LUZ; ARENAS-ALATORRE, JESÚS; GOGUITCHAISHVILI, AVTO y LOPES, OMAR FERREIRA (2013). «Microscopy and rock magnetism of fine grain-size titanomagnetite from the Jacupiranga Alkaline Complex, Brazil: Unearthing Ti-magnesian ferrite nanoparticles». *Geofísica Internacional*, **52(2)**, pp. 93–110.
- ARAI, Y (1963). «Secular variation in intensity of the past geomagnetic field». *M. Sc. Thesis, Univ. of Tokyo*, p. 84.
- BARKHAUSEN, HEINRICH (1919). «Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen». *Phys. Z.*, **20**, p. 401.

- BARRACLOUGH, DR; HARWOOD, JM; LEATON, BR y MALIN, SRC (1975). «A model of the geomagnetic field at 1975». *Geophysical Journal International*, **43(3)**, pp. 645–649.
- BARRERA RODRÍGUEZ, RAÚL.; MARTÍNEZ. MEZA, ROBERTO.; MORALES SÁNCHEZ, ROCÍO. y VALLIN VÁZQUEZ, LORENA (2012). «Espacios rituales frente al Templo Mayor de Tenochtitlan». *Arqueología Mexicana*, **19(116)**, pp. 18–23.
- BIGGIN, ANDREW J. y PATERSON, GREIG A. (2014). «A new set of qualitative reliability criteria to aid inferences on palaeomagnetic dipole moment variations through geological time». *Frontiers in Earth Science*, **2(October)**, pp. 1–9.
- BIGGIN, ANDREW J. y PERRIN, MIREILLE (2007). «The behaviour and detection of partial thermoremanent magnetisation (PTRM) tails in Thellier palaeointensity experiments». *Earth, Planets and Space*, **59(7)**, pp. 717–725.
- BÖHNEL, HARALD; MCINTOSH, GREGG y SHERWOOD, GRAHAM (2002). «A parameter characterising the irreversibility of thermomagnetic curves». *Physics and Chemistry of the Earth*, **27(25-31)**, pp. 1305–1309.
- BOYD, MARK (1986). «A new method for measuring palaeomagnetic intensities». *Nature*, **319(6)**, pp. 208–209.
- BOYLE, R. (1691). *Experimenta & Observations Physicae*. J. Taylor and J. Wyat, London.
- BROWN, MAXWELL C; DONADINI, FABIO; KORTE, MONIKA; NILSSON, ANDREAS; KORHONEN, KIMMO; LODGE, ALEXANDRA; LENGYEL, STACEY N y CONSTABLE, CATHERINE G (2015). «GEOMAGIA50.v3: 1. general structure and modifications to the archeological and volcanic database». *Earth, Planets and Space*, **67(1)**, p. 83.
- BUCHA, V.; TAYLOR, R. E.; BERGER, RAINER y HAURY, E. W. (1970). «Geomagnetic Intensity: Changes during the Past 3000 Years in the Western Hemisphere». *Science*, **168(3927)**.
- CAMPBELL, WALLACE H. (2003). *Introducción to geomagnetic fields*. Cambridge University Press, second edición.

- CARLSON, JOHN B. (1975). «Lodestone Compass: Chinese or Olmec Primacy?» *Science*, **189**(4205).
- CASAS, LL. y INCORONATO, A. (2007). «Distribution analysis of errors due to relocation of geomagnetic data using the 'Conversion via Pole' (CVP) method: implications on archaeomagnetic data». *Geophysical Journal International*, **169**(2), pp. 448–454.
- CHAUVIN, A.; GARCIA, Y.; LANOS, PH y LAUBENHEIMER, F. (2000). «Paleointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France». *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **120**(1), pp. 111–136.
- COE, MICHAEL D.; DIEHL, RICHARD A. y STUIVER, MINZE (1967). «Olmec Civilization, Veracruz, Mexico: Dating of the San Lorenzo Phase». *Science*, **155**(3768).
- COE, ROBERT S. (1967). «Paleo-intensities of the Earth's magnetic field determined from Tertiary and Quaternary rocks». *Journal of Geophysical Research*, **72**(12), p. 3247.
- COE, ROBERT S.; GROMMÉ, SHERMAN y MANKINEN, EDWARD A. (1978). «Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low». *Journal of Geophysical Research*, **83**(B4), p. 1740.
- CULLITY, B. D. y GRAHAM, C.D. (2009). «CLASSICAL THEORY OF PARAMAGNETISM». En: *Introducción to magnetic materials*, capítulo Capítulo 3, pp. 87–109. John Wiley & Sons, Inc., segunda edición.
- CURIE, P. (1895). *Propriétés Magnétiques des Corps à Diverses Températures*. volumen 7. Gauthier-Villars et fils.
- DANEELS, A.; GUERRERO, L. y LIBEROTTI, G. (2013). «Monumental earthen architecture in the humid tropics of Mexico: Archaeological evidence of a millenary tradition». *WIT Transactions on the Built Environment*, **131**, pp. 457–468.
- DANEELS, ANNICK (2008). «Monumental Earthen Architecture at La Joya, Veracruz, México». *Informe técnico*, Fundación for the Advancement of Mesoamerican Studies, INC..

- DAY, R; FULLER, M y SCHMIDT, V A (1977). «Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence». *Phys. Earth Planet. Inter.*, **13**, pp. 260–267.
- DEARING, JOHN A. (1999). «Environmental Magnetic Susceptibility Using the Bartington MS2 System». *Interpretation A Journal Of Bible And Theology*, p. 52.
- DONADINI, F.; KORTE, M. y CONSTABLE, C. G. (2009). «Geomagnetic field for 0-3 ka: 1. New data sets for global modeling». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **10(6)**.
- DUNLOP, DAVID J. (2002a). «Theory and application of the Day plot (M_r/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data». *J Geophys Res-Sol Ea*, **107(B3)**, p. 2056.
- (2002b). «Theory and application of the Day plot (M_r/M_s versus H_{cr}/H_c) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils». *Journal of Geophysical Research*, **107(B3)**, pp. 1–15.
- (2011). «Physical basis of the Thellier-Thellier and related paleointensity methods». *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **187(3-4)**, pp. 118–138.
- DUNLOP, DAVID J. y OZDEMIR, O. (2000). «Effect of grain size and domain state on thermal demagnetization tails». *Geophysical Research Letters*, **27(9)**, pp. 1311–1314.
- DUNLOP, DAVID J.; ZHANG, BAOXING y ÖZDEMIR, ÖZDEN (2005). «Linear and nonlinear Thellier paleointensity behavior of natural minerals». *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, **110(1)**, pp. 1–15.
- EIGHMY, JEFFREY L. y STERNBERG, RS (1990). *Archaeomagnetic dating*. The University of Arizona Press.
- FABIAN, KARL (2001). «A theoretical treatment of paleointensity determination experiments on rocks containing pseudo-single or multi domain magnetic particles». *Earth and Planetary Science Letters*, **188(1-2)**, pp. 45–58.

- FANJAT, G.; CAMPS, P.; ALVA VALDIVIA, L. M.; SOUGRATI, M. T.; CUEVAS-GARCIA, M. y PERRIN, M. (2013). «First archeointensity determinations on Maya incense burners from Palenque temples, Mexico: New data to constrain the Mesoamerica secular variation curve». *Earth and Planetary Science Letters*, **363**, pp. 168–180.
- FOLGERHAITER, G. (1896). «Ricerche sull' Inclinazione Magnetica all' Epoca Etrusca». *Rendiconti della R. Accademia dei Lincei*, **5**, pp. 293–300.
- (1897a). «La magnetizzazione dell' Argilla Colla Cottura in Relazione Colle Ipotesi Sulla Fabbricazione del Vasellame Nero Etrusco». *Rendiconti della R. Accademia dei Lincei*, **6**, pp. 368–376.
- (1897b). «Sulla Forza Coeritiva dei Vasi Etruschi». *Rendiconti della R. Accademia dei Lincei*, (**6**), pp. 64–70.
- (1899). «Sur les variations séculaires de l'inclinaison magnétique dans l'antiquité». *Archives des Sciences Physiques et Naturelles*, **8**, pp. 5–16.
- FOX, J M W y AITKEN, M J (1980). «Cooling-rate dependence of thermoremanent magnetisation».
- GALLIPOLI, D; BRUNO, A; PERLOT, C y SALMON, N (2014). «Raw earth construction: Is there a role for unsaturated soil mechanics?» *Unsaturated Soils: Research & Applications*, pp. 55–62.
- GELLIBRAND, HENRY (1635). *A Discourse Mathematicall on the Variation of the Magneticall Needle*. volumen 5. William Jones (Reprinted in Neudrucke von Shriften und Karten über Meteorologie und Erdmagnetismus, edited by G. Hellmann, vol. 9, Berlin, 1897, reprinted by Kraus-Thomson, Nendeln, Liechtenstein, 1969.), Londres.
- GHERADI, S. (1862). «Sul Magnetismo Polare de Palazzi ed Altri Edifizi in Torino». *Il Nuovo Cimento*, **35**, pp. 384–404.
- GILBERT, WILLIAM (1893). *De Magnete*. Excudebat Petrus Short, Londres, (english tl edición).
- GÓMEZ-PACCARD, M.; CHAUVIN, A.; LANOS, P. y THIRIOT, J. (2008). «New archeointensity data from Spain and the geomagnetic dipole moment in western Europe over the past 2000 years». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **113(9)**, pp. 1–17.

- GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, GALIA y BERAMENDI O., LAURA (2016). «Reporte de resultados del Laboratorio de Radiocarbono- UNAM. Folio 078.» *Informe técnico*, Instituto de Geofísica. UNAM..
- HAINES, G. V. (1985). «Spherical cap harmonic analysis». *Journal of Geophysical Research*, **90(B3)**, pp. 2583–2591.
- HALLEY, E. (1692). «An account of the cause of the change of the variation of magnetic needle; with an hypothesis of the structure of the internal part of the Earth». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **17**, pp. 563–578.
- HAMMOND, MEGAN (2014). *The use of archaeomagnetism to answer archaeological and geomagnetic questions with particular focus on determination of the strength of the geomagnetic field in the Middle East during the Bronze Age*. Tesis doctoral, Universidad de Liverpool.
- HERAS Y MARTÍNEZ, CÉSAR M. (1992). «Glosario terminológico para el estudio de las cerámicas arqueológicas». *Revista Española de Antropología Americana*, **22**, pp. 9–34. ISSN 0556-6533.
- HUS, J y GEERAERTS, R (2003). «Archaeomagnetism and archaeomagnetic dating».
- KISSEL, CATHERINE y LAJ, CARLO (2004). «Improvements in procedure and paleointensity selection criteria (PICRIT-03) for Thellier and Thellier determinations: Application to Hawaiian basaltic long cores». *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **147(2-3 SPEC.ISS.)**, pp. 155–169.
- KONO, M y UENO, N (1977). «Paleointensity determination by a modified Thellier method». *Physics of the Earth and Planetary Interiors*.
- KONO, MASARU (1974). «Intensities of the earth's magnetic field about 60 m.y. ago determined from the Deccan Trap Basalts, India». *Journal of Geophysical Research*, **79(8)**, pp. 1135–1141.
- KORTE, M.; DONADINI, F. y CONSTABLE, C. G. (2009). «Geomagnetic field for 0-3 ka: 2. A new series of time-varying global models». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **10(6)**.

- LANOS, PHILIPPE (2004). «Bayesian inference of calibration curves: application to archaeomagnetism». En: *Tools for constructing chronologies: Crossing disciplinary boundaries*, pp. 43–82. Springer London.
- LEONHARDT, R.; HEUNEMANN, C. y KRASA, D. (2004). «Analyzing absolute paleointensity determinations: Acceptance criteria and the software ThellierTool4.0». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **5(12)**, pp. 1–11.
- LEONHARDT, ROMAN; HUFENBECHER, FELIX; HEIDER, FRANZ y SOFFEL, HEINRICH C. (2000). «High absolute paleointensity during a mid Miocene excursion of the Earth's magnetic field». *Earth and Planetary Science Letters*, **184(1)**, pp. 141–154.
- LOPEZ, RAÚL ÁVILA (1995). «Excavaciones arqueológicas en San Gregorio Atlapulco, Xochimilco». *Reporte presentado a la Subdirección de Salvamento Arqueológico, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Ciudad de México*.
- LÓPEZ-TÉLLEZ, J. M.; AGUILAR-REYES, B.; MORALES, J.; GOGUITCHAICHVILI, A.; CALVO-RATHERT, M. y URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. (2008). «Magnetic characteristics and archeointensity determination on Mesoamerican Pre-Columbian Pottery from Quiahuitlan, Veracruz, Mexico». *Geofísica Internacional*, **47(4)**, pp. 329–340.
- MALMSTROM, VINCENT H. (1976). «Knowledge of magnetism in pre-Columbian Mesoamerica». *Nature*, **259(5542)**, pp. 390–391.
- MCCLELLAND-BROW, ELIZABETH (1984). «Experiments on TRM intensity dependence on cooling rate». *Geophysical Research Letters*, **11(3)**, pp. 205–208.
- MCCLUNG DE TAPIA, EMILY y ACOSTA OCHOA, GUILLERMO (2015). «Una ocupación del periodo de agricultura temprana en xochimilco (CA. 4200-4000 A.N.E.)». *Anales de Antropología*, **49(2)**, pp. 299–315.
- MCCRONE, JOHN (2000). «Fire up». *New scientist*, **166(2239)**, pp. 30–34.

- MERCANTON, P. L. (1907). «La Méthode de Folgerhaiter et son Rôle en Géophysique». *Archives des Sciences Physiques et Naturelles* 1, **5**, pp. 203–205.
- (1918). «État Magnétique de Quelques Terres Cuites Préhistoriques». *Comptes Rendus de l'Académie de Sciences* 1, **166**, pp. 681–685.
- MONTERO G., DONAJÍ (2016). «Salvamento Arqueológico Av. Aquiles Serán No. 460, Col. Santiago de Tulyehualco, Del. Xochimilco, D.F.». <http://arqueologia.inah.gob.mx/?p=1104>
- MORALES, JUAN (2008). *Sistema para prensado de núcleos paleomagnéticos*. Manual interno de laboratorio. Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA), Instituto de Geofísica, UNAM, Campus Morelia.
- MORALES, JUAN y GOGUITCHAICHVILI, AVTO (2009). «Magnetic properties and archeointensity determination on Pre-Columbian pottery from Chiapas , Mesoamerica». *Earth, Planets and Space Sciences*, **61**, pp. 83–91.
- MORALES, JUAN; GOGUITCHAICHVILI, AVTO; AGUILAR-REYES, BERTHA A.; PINEDA, MODESTO; CARVALLO, CLAIRE; BERAMENDI-OROSCO, LAURA; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, GALIA y OLIVEROS, ARTURO (2012). «Rock-Magnetic and Archeointensity Investigation of Pottery and a Burned Floor at the Tzintzuntzan Archaeological Site, Western Mexico». *Geoarchaeology*, **27(6)**, pp. 521–537.
- MORALES, JUAN; GOGUITCHAICHVILI, AVTO; DE LOS ÁNGELES OLAY BARRIENTOS, MARÍA; CARVALLO, CLAIRE y AGUILAR REYES, BERTHA (2013). «Archeointensity investigation on pottery vestiges from Puertas de Rolón, Capacha culture: In search for affinity with other Mesoamerican pre-Hispanic cultures». *Studia Geophysica et Geodaetica*, **57(4)**, pp. 605–626.
- MOSKOWITZ, BRUCE M. (1981). «Methods for estimating Curie temperatures of titanomaghemites from experimental Js-T data». *Earth and Planetary Science Letters*, **53(1)**, pp. 84–88.

- NAGATA, T.; ARAI, Y. y MOMOSE, K. (1963). «Secular variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years.» *Journal of Geophysical Research*, **68**, p. 5277.
- NAGATA, TAKESI; KOBAYASHI, KAZUO y SCHWARZ, E J (1965). «Archeomagnetic Intensity Studies of South and Central America.» *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **17(3)**, pp. 399–405.
- NÉEL, L (1949). «Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites.» *Ann. géophys.*
- NIEDERBERGER, B.C. (1976). *Cinco milenios de ocupación humana en un sitio lacustre de la cuenca de México*. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- ORTEGA, B.; CABALLERO, C.; LOZANO, S.; ISRADE, I. y VILA CLARA, G (2002). «52000 years of environmental history in Zacapu basin, Michoacán, México: the magnetic record.» *Earth and Planetary Science Letters*, **202**, pp. 663–675.
- OZIMA, MINORU y OZIMA, MITUKO (1965). «Origin of Thermoremanent Magnetization.» *Journal of Geophysical Research*, **70(6)**, pp. 1363–1369.
- PARSONS, JEFFREY; BRUMFIELD, ELIZABETH; PARSONS, MARY H. y WILSON, DAVID J. (1982). *Prehispanic settlement patterns in the southern valley of Mexico: the Chalco-Xochimilco region*. University of Michigan, Ann Arbor.
- PAVÓN-CARRASCO, FCO JAVIER; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, JUAN; OSETE, MARIA LUISA y TORTA, J. MIQUEL (2011). «A Matlab tool for archaeomagnetic dating.» *Journal of Archaeological Science*, **38(2)**, pp. 408–419.
- PAVÓN-CARRASCO, FRANCISCO JAVIER; OSETE, MARÍA LUISA; TORTA, JOAN MIQUEL y DE SANTIS, ANGELO (2014). «A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data.» *Earth and Planetary Science Letters*, **388**, pp. 98–109.
- PÉTRONILLE, MARIE; GOGUITCHAICHVILI, AVTO; MORALES, JUAN; CARVALLO, CLAIRE y HUEDA-TANABE, YUKI (2012). «Absolute geomagnetic intensity determinations on Formative potsherds (1400-700

- BC) from the Oaxaca Valley, Southwestern Mexico». *Quaternary Research (United States)*, **78(3)**, pp. 442–453.
- PINEDA DURAN, MODESTO; GOGUITCHAICHVILI, AVTO; MORALES, JUAN; AGUILAR REYES, BERTHA; ALVA VALDIVIA, LUIS M; OLIVEROS-MORALES, ARTURO; CALVO-RATHERT, MANUEL; GONZALEZ MORAN, TOMAS y ROBLES-CAMACHO, JASINTO (2010). «Magnetic properties and Archeointensity of Earth's magnetic field recovered from El Opeño, earliest funeral architecture known in Western Mesoamerica». *Studia Geophysica et Geodaetica*, **54(4)**, pp. 575–593.
- RODRIGUEZ CEJA, MARIA; GOGUITCHAICHVILI, AVTO; MORALES, JUAN; OSTROUMOV, MIKHAIL; MANZANILLA, LINDA R.; REYES, BERTHA AGUILAR y URRUTIA-FUCUGAUCHI, JAIME (2009). «Integrated archeomagnetic and micro-Raman spectroscopy study of pre-Columbian ceramics from the Mesoamerican formative village of Cuanalan, Teotihuacan Valley, Mexico». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **114(4)**.
- SELKIN, P. A. y TAUXE, LISA (2000). «Long-term variations in palaeointensity». *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **358(1768)**, pp. 1065–1088.
- SHCHERBAKOV, V. P.; MCCLELLAND, E. y SHCHERBAKOVA, V. V. (1993). «A model of multidomain thermoremanent magnetization incorporating temperature-variable domain structure». *Journal of Geophysical Research*, **98(B4)**, p. 6201.
- SHCHERBAKOVA, V. V.; SHCHERBAKOV, V. P. y HEIDER, F. (2000). «Properties of partial thermoremanent magnetization in pseudosingle domain and multidomain magnetite grains». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **105(B1)**, pp. 767–781.
- SKOMSKI, RALPH (2008). *Simple Models of Magnetism*. Oxford University Press, Oxford.
- SMITH, PETER J (1970). «Petrus Peregrinus' EPISTOLA; The Beginning of Experimental Studies of Magnetism in Europe.» *Atlas of Earth Science Reviews*, **6**, pp. A11–A17.

- SOLER-ARECHALDE, ANA MARIA (2014). «Arqueomagnetismo en México 1965-2013». *LatinMag Letters*, **4(4)**, pp. 1-14.
- STACEY, F.D. (1963). «The physical theory of rock magnetism». *Advances in Physics*, **12(45)**, pp. 45-133.
- STERN, DAVID P (2002). «A millennium of geomagnetism». *Reviews of Geophysics*, **40(3)**, pp. 1-30.
- TARLING, D.H. y HROUDA, F. (1993). *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman and Hall, London.
- TAUXE, LISA (1998). *Paleomagnetic Principles and Practice*. Iulwer Academic Publishers.
- TAYLOR, L A (1979). «An effective sample preparation technique for paleointensity determinations at elevated temperatures». En: *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th*, pp. 2183-2187.
- THELLIER, E (1938). «Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques». *Annales de l'Institut de Physique du Globe*, **16**, pp. 157-302.
- (1941). «Sur la vérification d'une méthode permettant de déterminer l'intensité du champ terrestre dans le passé». *Comptes rendus de l'Académie des sciences (Paris)*, **212**, pp. 281-283.
- (1946). «Sur la thermorémanence et la théorie du métamagnétisme». *Comptes rendus de l'Académie des sciences (Paris)*, **223**, pp. 319-321.
- (1959). «Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique». *Ann. Geophys.*
- THOMPSON, R. y OLDFIELD, F. (1986). *Environmental Magnetism*. Allen & Unwin, Londres.
- URRUTIA, J.; MAUPOME, L. y BROSCHÉ, P. (1981). «Archaeomagnetic research programme, I. An introduction to the knowledge of magnetism in pre-Columbian Mesoamerica». *Int. Rep. Inst. Geofis., UNAM, Mexico & Obs. Hoher List der Univ. Sternwarte, Bonn, Germany*, p. 25.

- (1986). «El compás magnético en China y Mesoamérica». *Bol. GEOS*, **6(3)**, pp. 5–7.
- VALET, JEAN-PIERRE (2007). «Paleointensity, Absolute, Techniques». En: David Gubbins y Emilio Herrero-Bervera (Eds.), *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, pp. 753–757. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- VALET, JEAN-PIERRE; BRASSART, JACQUES; LE MEUR, ISABELLE; SOLER, VICENTE; QUIDELLEUR, XAVIER; TRIC, EMMANUEL y GILLOT, PIERRE-YVES (1996). «Absolute paleointensity and magnetomineralogical changes». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **101(B11)**, pp. 25029–25044.
- VALET, JEAN PIERRE; TRIC, EMMANUEL; HERRERO-BERVERA, EMILIO; MEYNADIER, LAURE y LOCKWOOD, JOHN P. (1998). «Absolute paleointensity from Hawaiian lavas younger than 35 ka». *Earth and Planetary Science Letters*, **161(1-4)**, pp. 19–32.
- WALTON, D. (1980). «Time-temperature relations in the magnetization of assemblies of single domain grains». *Nature*, **286**, pp. 245–247.
- WALTON, D (1993). «Microwave Magnetisation». *Geophysical research letters*, **20(2)**, pp. 109–111.
- WEISS, PIERRE (1907). «L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique». *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, **6(1)**, pp. 661–690.
- WOLFMAN, DANIEL (1973). *A re-evaluation of Mesoamerican chronology: AD 1-1200*. Phd thesis, Colorado University, USA.
- ZIJDERVELD, J. D. A. (1967). «A.C. demagnetization of rocks: Analysis of results». En: D. W. Collinson; K. M. Creer y S. K. Runcorn (Eds.), *Methods in paleomagnetism*, pp. 254–286. Elsevier, Nueva York.