

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA,
ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA I
(GEOFÍSICA Y METEOROLOGÍA)**



**Master en Geofísica y Meteorología
Programa Oficial de Postgrado de Físicas
Trabajo de Investigación**

**DATACIÓN ARQUEOMAGNÉTICA Y
CARACTERIZACIÓN MAGNÉTICA DE UN
HORNO DE UN YACIMIENTO
ARQUEOLÓGICO DE CÓRDOBA**

Esther López Sánchez

Director: Dr. Gregg McIntoch

Septiembre 2007

AGRADECIMIENTOS:

Este trabajo de investigación ha sido realizado en el Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I (Geofísica y Meteorología), de la Facultad de Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, bajo la dirección del Dr. Gregg McIntoch, a quien agradezco las enseñanzas, el asesoramiento y dedicación para llevar a cabo el presente trabajo.

Mis agradecimientos a los profesores Dra. María Luisa Osete López y Dr. José Luis Vicent López por su estímulo y apoyo.

Agradezco, así mismo, al Dr. Jacques Thiriot y a todo su equipo, el trabajo de campo y el estudio arqueológico, que han hecho posible la realización de esta memoria.

Expreso mi gratitud a todos mis compañeros de paleomagnetismo por su gran colaboración, amistad y constante ayuda.

También quiero expresar mis agradecimientos a todos mis compañeros del Master y del Departamento por el apoyo, consejo y amistad brindados en todo momento.

Por último, agradezco de todo corazón el respaldo y sacrificio que mi familia y amigos han hecho desinteresadamente por mí.

RESUMEN:

El método de datación arqueomagnética es aplicado a un horno (COO62), de cocción de cerámica, situado en un yacimiento arqueológico de Córdoba, España.

La técnica está basada en las variaciones del campo magnético terrestre con el tiempo (variación paleosecular) y de la remanencia magnética de la estructura, al haber sido calentada.

La datación es determinada por la dirección característica de cada una de las muestras, a partir de todas ellas se toma una dirección promedio, que es la dirección arqueomagnética, y con esta dirección se recurre a la curva de variación paleosecular de Iberia y se determina la edad del último calentamiento de nuestra estructura.

Se obtuvo una edad comprendida entre los años 1144 y 1257 D.C., y una dirección $D=11.4^\circ$, $I=44.3^\circ$, comparándola con datos de un estudio arqueomagnético anterior, McIntoch G. and Catanzariti G. (2006), de la estructura (COO94) también situada en Córdoba y perteneciente a la época de los años 1161-1342 D.C. y dirección $D=8.9^\circ$, $I=44.3^\circ$, se pudo observar que los dos hornos eran coetáneos, y sus direcciones son indistinguibles.

También, se ha realizado un estudio de la mineralogía magnética presente en la estructura obteniéndose tres fases diferentes debidas a magnetita con una determinada cantidad introducida de titanio, hematita y a otro mineral con alta coercitividad y baja temperatura de desbloqueo.

ÍNDICE:

1. Introducción	1
2. Antecedentes	1
2.1. Descripción de las propiedades del campo geomagnético	1
2.2. Curvas de variación paleosecular	2
2.3. Arqueomagnetismo	3
2.3.1. Propiedades magnéticas de la materia	3
2.3.2. Propiedades de los minerales de interés especial en arqueomagnetismo	5
2.3.3. Tipos de magnetizaciones remanentes que pueden adquirir los minerales magnéticos presentes en las muestras arqueomagnéticas	7
2.3.4. Análisis de direcciones	8
3. Muestreo y preparación de especímenes	11
3.1. Muestreo en el campo	11
3.2. Preparación de especímenes arqueomagnéticos	12
3.3. Submuestreo para el estudio de la mineralogía magnética	13
4. Datos experimentales	13
4.1. Metodología	13
4.1.1. Susceptibilidad e intensidad de NRM inicial	13
4.1.2. Desimanación progresiva por campos alternos decrecientes	14
4.1.3. Desimanación térmica del NRM	14
4.1.4. Adquisición del IRM y desimanación térmica del IRM	15
4.1.5. Curvas de histéresis, adquisición IRM, desimanación por campo inverso	15
4.2. Resultados	16
4.2.1. Estudio de la dirección del NRM inicial	16
4.2.2. Estabilidad de la desimanación por campos alternos (AF)	18
4.2.3. Desimanación progresiva por campos alternos decrecientes	19
4.2.4. Estabilidad de la desimanación térmica del NRM	21
4.2.5. Desimanación térmica	22
4.2.6. Cálculo de direcciones arqueomagnéticas	23
4.2.7. Susceptibilidad e intensidad de NRM inicial	24
4.2.7. Curvas de histéresis, adquisición de IRM, desimanación por campo inverso	25
4.2.6. Adquisición de IRM y desimanación térmica del IRM	28
5. Discusión	33
5.1. Direcciones arqueomagnéticas	33
5.2. Datación arqueomagnética	33
5.3. Comparación con la estructura COO94	35
6. Conclusiones	36
7. Referencias	36

1. Introducción:

La datación arqueomagnética se basa en el paralelismo entre la imanación memorizada por la estructura y el campo magnético reinante en el momento en que es adquirida. A su vez, el campo magnético terrestre varía con el tiempo, y el cambio viene registrado por la curva de variación paleosecular; además esta curva posee una variación regional. Basándose en estas características se puede datar la estructura tomando como referencia la curva de variación paleosecular de Iberia.

Los principales objetivos de este estudio son:

1. Datar la estructura COO62 de un yacimiento arqueológico utilizando el método de la datación arqueomagnética.
2. Comprobar si nuestra estructura COO62 es coetánea con otra estructura del mismo lugar, estudiada anteriormente, la COO94.
3. Identificar los materiales magnéticos, mediante el estudio a de las fases que llevan asociada la señal estable de dicha estructura.

2. Antecedentes:

La descripción teórica que se hace en este apartado es un breve resumen de los temas referentes temas encontrados en los siguientes libros:

Udías A., y Mezcuca J. 1986. Fundamentos de geofísica.

Butler, R.F., 1992. *Paleomagnetism*.

Tauxe, L., 2005., *Lectures in Paleomagnetism*.

Para todo conocimiento más profundo se recomienda su consulta.

2.1. Descripción de las propiedades del campo geomagnético:

El campo magnético terrestre es predominantemente dipolar. Está representado por un dipolo situado en el centro de la Tierra e inclinado 11.5° respecto del eje de rotación. Los polos de este modelo dipolar son los polos geomagnéticos, localizados donde la extensión del dipolo corta a la superficie de la Tierra. Si el campo geomagnético fuese exactamente

el de un dipolo geocéntrico inclinado, entonces los polos geomagnéticos coincidirían con los puntos de inclinación 90° . En la práctica, estos polos no coinciden con los indicados por el campo geomagnético. El dipolo geocéntrico inclinado contribuye aproximadamente al 90% del campo en la superficie y la cantidad restante de campo no dipolar puede ser significativa. De hecho, si el campo estuviese formado por un dipolo, las isodinámicas serían circunferencias alrededor del eje del imán (eje geomagnético).

Para resolver este problema se tiene en cuenta otra aproximación, que consiste en tomar un dipolo desplazado hacia el Oeste del Océano Pacífico, unos 450Km en la dirección de latitud $\lambda = 151^\circ E$ y longitud $\phi = 16^\circ N$, y es la llamada “aproximación de dipolo excéntrico”, en algunas zonas produce mejoras y en otras aumenta los errores. Además, no permite explicar la línea áгона (línea de declinación cero) hacia el Este de Japón, desde la India hasta Siberia.

2.2. Curvas de variación paleosecular:

La dirección y magnitud del campo geomagnético en la superficie cambia con el tiempo, estos cambios tienen periodos temporales de entre 1 y 10^5 años, constituyendo la variación secular geomagnética.

Los datos de variación paleosecular son muy parecidos sobre regiones subcontinentales. Por ejemplo, la curva de variación paleosecular observada en París es similar a la de Londres. Sin embargo, de un continente a otro, las curvas de variación paleosecular son muy diferentes. Esta observación, probablemente, refleja el tamaño de las fuentes no dipolares del campo geomagnético dentro del núcleo terrestre.

La obtención de registros de la variación secular geomagnética fue uno de los objetivos iniciales de las investigaciones paleomagnéticas y actualmente es un área de intensa investigación. La información necesaria sobre variación secular ha sido provista por el paleomagnetismo de piezas arqueológicas (arqueomagnetismo), rocas volcánicas del Holoceno (periodo geológico los últimos 10000 años) y sedimentos de lagos postglaciales.

El origen de la variación secular geomagnética puede ser subdividida en dos contribuciones con periodicidades que se solapan: cambios no dipolares del campo dominando los periodos más cortos y cambios del campo dipolar con los periodos más largos. A través de la historia, ha habido una tendencia de caída del campo no dipolar hacia el oeste produciéndose un cambio en la longitud con una velocidad, aproximadamente, de 0.4° por año.

La variación del campo geomagnético, en el pasado arqueológico, puede ser obtenida a partir de direcciones paleomagnéticas determinadas a partir de estructuras arqueológicas calentadas y bien datadas. Los datos arqueomagnéticos, están presentes en los registros paleomagnéticos de más alta resolución del último milenio, son usados para construir las curvas de referencia de variación paleosecular, que proveen el conocimiento de las variaciones de campo geomagnético a escala regional y global, para periodos que abarcan

los últimos milenios. Estas regiones que cubre la curva son de alrededor de 600-900 Km², área en que se puede asumir que el campo es dipolar.

En combinación con los datos históricos, las curvas de variación paleosecular detalladas pueden usarse para propósitos de datación. Se realizan comparando las direcciones de la estructura desconocida con la curva de variación paleosecular y el acoplamiento de los resultados nos da el intervalo temporal buscado.

En este trabajo se ha utilizado la curva de variación paleosecular para Iberia de Gómez-Paccard M. (2006).

2.3. Arqueomagnetismo:

2.3.1. Propiedades magnéticas de la materia:

Las propiedades magnéticas de la materia vienen determinadas por los momentos magnéticos cuantizados de los átomos, debido a los movimientos orbitales y a los espines de los electrones.

Paramagnetismo: los momentos magnéticos de los átomos no interaccionan entre sí orientándose libremente; al aplicar un campo magnético se alinean con el campo aplicado, apareciendo una imanación inducida paralela al campo, y a la vez esta imanación disminuye al aumentar la temperatura. En el caso ideal, la susceptibilidad χ varía como $\frac{1}{T}$, que es la Ley de Curie de susceptibilidad paramagnética.

$$M = \chi H \cos \chi > 0 \quad (\chi \approx 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Kg})$$

Ferromagnetismo: los momentos magnéticos de átomos vecinos tienen fuertes interacciones. Esta interacción produce una magnetización en los sólidos ferromagnéticos, superior a la de los paramagnéticos en presencia del mismo campo magnetizante, haciendo que los momentos magnéticos se orienten paralelos, al cesar la aplicación del campo magnético la imanación no regresa a cero por memorizar el campo aplicado. El valor de la imanación en este caso se llama *imanación remanente de saturación*.

Dominios magnéticos: son pequeñas regiones dentro del grano con imanación uniforme, pero el vector magnetización dentro de cada región difiere del de sus vecinos.

La formación de dominios magnéticos hace que decrezca la energía magnetostática ya que el porcentaje de superficie cubierta por cargas magnéticas se reduce, y cargas de signo opuesto son adyacentes en vez de estar separadas. Dentro de cada dominio individual la magnetización es M_s , pero el grano entero tiene magnetización $M \ll M_s$.

El conocimiento del estado de dominio permite determinar la estabilidad de la remanencia y a la vez de la señal.

Granos monodominio: al disminuir el tamaño de grano también decrece el número de dominios magnéticos. Finalmente, el grano se hace tan pequeño que la energía requerida para formar una pared es mayor que el decrecimiento en energía magnetostática procedente de la división del grano en dos dominios. Por debajo de este tamaño de partícula, no es energéticamente favorable el subdividir el grano en numerosos dominios, por tanto, el grano contendrá solamente un dominio.

La propiedad principal es que poseen una remanencia estable a lo largo de escala geológica y arqueológica, implicando que la señal es estable.

Granos multidominios: granos de minerales que contienen varios dominios. Las propiedades principales son, granos de tamaño más grande que los monodominios, con menor intensidad de remanencia y menos estables a lo largo del tiempo.

Granos pseudo-monodominios: granos que sólo contienen algunos dominios; estrictamente son multidominios, pero poseen muchas propiedades de ensamblaje iguales a las de los verdaderos granos monodominios.

Superparamagnetismo: aumenta a partir del tiempo de estabilidad de la remanencia.

En el ferromagnetismo el comportamiento entre M y H ya no es lineal. La curva que realiza el valor de la magnetización M , en función del campo aplicado H , se llama *curva de histéresis*.

Para un determinado material ferromagnético y una temperatura dada hay un máximo valor de imanación que es la *imanación de saturación*, M_s , una vez alcanzada, aunque el valor del campo magnético siga aumentando, no aumentará el valor de la imanación.

La imanación de saturación decrece al aumentar la temperatura, llegando a tomar el valor cero a la Temperatura de Curie, característica de cada material ferromagnético.

Al quitar el campo magnético la muestra queda con una imanación, es la *imanación remanente de saturación*, M_{rs} .

La *coercitividad* H_c , se determina al aplicar una desimanación por campo inverso a la imanación de saturación, M_{rs} , se obtiene un punto en el que la imanación es igual a cero.

Tipos de ferromagnetismo:

- Ferromagnetismo: sólidos en los que todos los momentos magnéticos de sus átomos son paralelos.
- Antiferromagnetismo: los momentos magnéticos son paralelos dentro de la misma capa, pero antiparalelos entre capas. Todos tienen el mismo valor. Al alcanzar la temperatura de Néel desaparece el acoplamiento antiferromagnético.
- Ferrimagnetismo: los momentos magnéticos antiparalelos entre capas son de distintos valores.

- Antiferromagnetismo imperfecto: materiales antiferromagnéticos que pueden tener un momento neto si los espines no están perfectamente compensados debido a defectos en la estructura cristalina. Estos espines proceden de un momento defectuoso.

2.3.2. Propiedades de los minerales de interés especial en arqueomagnetismo:

Los minerales ferromagnéticos más importantes presentes en la materia arqueomagnética son óxidos de hierro-titanio.

Titanomagnetitas: son minerales cúbicos y opacos, con composición entre la magnetita (Fe_3O_4) y el ulvoespinelo (Fe_2TiO_4).

- El *ulvoespinelo* es un material paramagnético a temperatura ambiente, se presenta en la naturaleza en estructura de intercrecimiento con la magnetita.
- La *magnetita* es el principal mineral de interés paleomagnético, cristaliza en el sistema cúbico. Es un mineral ferrimagnético que presenta anisotropía magnetocristalina. Su magnetización de saturación es de 90-93 Am²/Kg, la temperatura de Curie es de 578° C. Tiene coercitividad Hc bajas con valores de entre 10 y 50 mT y con Ms elevadas, obteniéndose curvas de histéresis altas y delgadas.

Las propiedades magnéticas de las titanomagnetitas varían según su contenido de titanio, es decir, al añadir titanio la temperatura de Curie disminuye y también disminuye la magnetización de saturación Ms y aumenta la coercitividad Hc.

Titanohematitas o hemohefanitas: son minerales generalmente opacos con una estructura magnética fácilmente describible usando el sistema hexagonal, con composición entre la hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) a la ilmenita (FeTiO_3).

La hematita es el mineral más importante de la serie.

- *Hematita*: es un mineral antiferromagnético, que a temperatura ambiente presenta un ferromagnetismo parásito. Su magnetización de saturación Ms es de 0.2-0.4 Am²/Kg y temperatura de Néel de 675° C. Tiene coercitividad Hc altas entre 0.1- 0.5T y al tener Ms bajas, las curvas de histéresis serán bajas y anchas; las curvas de adquisición de IRM serán bajas y no alcanzarán la saturación en el campo máximo aplicado.

Titanomaghemita: son óxidos de hierro y titanio que cristalizan en el sistema cúbico, como las titanomagnetitas, que por su composición química están comprendidas dentro del cuadrilátero definido por las series magnetita, ulvoespinelo y hematita, ilmenita. En el laboratorio, se puede conseguir titanomaghemita a través de un prolongado calentamiento de titanomagnetita a baja temperatura, inferior a 300° C. La temperatura de Curie no se ha podido determinar experimentalmente debido a que estos minerales sufren una transformación alrededor de 350° C, originándose hematita y otros productos que dependen de la composición inicial.

- *Maghemita*: ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) es el producto de alteración más común de la titanomagnetita a baja temperatura, es un mineral metaestable que se transforma en hematita a 250-300° C. Cristaliza en el sistema cúbico, su magnetización de saturación y otras propiedades magnéticas son del mismo orden que la magnetita. Con coercitividades Hc bajas y Ms elevadas, de 74 Am²/Kg, con lo que se obtienen curvas de histéresis altas y delgadas.

Otros minerales de interés paleomagnético:

- *Goetita* (αFeOOH): es un mineral antiferromagnético. Tiene una temperatura de Néel de 100-120° C. Con coercitividades Hc altas, cientos de Teslas, y Ms bajas, entre 10⁻³ -1 Am²/Kg por lo que las curvas de histéresis serán bajas y anchas. Al ser esta coercitividad parecida a la de la hematita, se podrá determinar si es un mineral u otro a través de la temperatura de Néel característica de cada uno.
Es un mineral secundario, que puede llevar asociada una señal secundaria, que puede esconder la señal arqueomagnética.

Mineral	Comportamiento	Temperatura de Curie (°C)	Magnetización de saturación (Am ² /Kg)	Coercitividad Remanencia
<i>Magnetita</i>	Ferrimagnético	578	90-93	10-50 mT
<i>Hematita</i>	Ferromagnetismo parásito	675	0.2-0.4	0.1-0.5 T
<i>Maghemita</i>	Ferrimagnético	590-675	80-85	10-50 mT
<i>Goetita</i>	Ferromagnetismo parásito	70-120	10 ⁻³ -1	0.3 T

Tabla 1. Propiedades de los minerales principales de interés arqueomagnético.

2.3.3. Tipos de magnetizaciones remanentes que pueden adquirir los minerales magnéticos presentes en las muestras arqueomagnéticas:

Los minerales magnéticos pueden adquirir una magnetización permanente paralela al campo existente en la zona de formación de la roca, a esta magnetización relacionada con la época de formación de la roca, se le denomina *remanencia magnética primaria*.

Desde su época de formación hasta la actualidad las rocas pueden ir adquiriendo otras magnetizaciones remanentes, llamadas *magnetizaciones secundarias*.

El vector magnetización, medido en el laboratorio, es la suma de todas las remanencias presentes en la roca, es decir, las primarias y las secundarias. Este vector recibe el nombre de *remanencia magnética natural (NRM)*. Se estudia la estabilidad de NRM aislando las primarias y las secundarias.

En arqueomagnetismo el NRM de interés es una componente secundaria, adquirida después de la formación, durante el último calentamiento del horno, el cual es utilizado para la datación.

Las remanencias principales en material arqueológico que ha sido calentado son:

La *magnetización termorremanente o termorremanencia (TRM)*, es la adquirida por una roca cuando ha sido calentada a una temperatura superior a la temperatura de Curie y posteriormente sufre un enfriamiento hasta la temperatura ambiental en presencia de un campo magnético. Apareciendo una imanación espontánea. Los granos de materiales ferromagnéticos se encuentran en situación paramagnética y se alcanza la magnetización de equilibrio en presencia de un campo magnético débil, como el terrestre. Si la temperatura disminuye, sobrepasando las temperaturas de desbloqueo de los diferentes granos, el tiempo de relajación de éstos aumenta muy rápidamente y la magnetización de equilibrio adquirida llega a “congelarse”. Los granos pasan a un estado de “momento bloqueado” y los posteriores cambios en la dirección del campo externo débil, que ocurren a temperaturas inferiores a la de desbloqueo, producen magnetización en los granos.

Si se produce un segundo calentamiento a una temperatura superior a la del inicial, que ya era mayor que la temperatura de Curie, la roca adquiere una nueva TRM, utilizada para la datación del último calentamiento.

Las rocas que han estado sometidas a otro proceso de calentamiento posterior, donde la temperatura de calentamiento es inferior a la temperatura de Curie, adquieren una nueva magnetización remanente y se denomina *termorremanencia parcial (pTRM)*.

La *magnetización remanente química (CRM)* se produce cuando la roca en presencia de un campo magnético sufre alteraciones químicas afectando a sus minerales, dándose la formación de nuevos granos y nuevas fases magnéticas.

La *magnetización remanente viscosa (VRM)*. Se produce en todas las rocas en presencia del campo geomagnético actual, pero en el momento en que deja de actuar dicho campo la imanación desaparece. Esta magnetización se debe a la variación gradual de la imanación con el tiempo, observada en todas las sustancias ferromagnéticas. Esta

variación no es muy grande comparada con la experimentada durante el almacenaje en el laboratorio, llamada viscosidad magnética.

La *magnetización remanente isoterma (IRM)* es la remanencia adquirida por una roca después de haber estado sometida a un campo magnético, posteriormente eliminado sin que existan variaciones térmicas. Según aumenta el valor del campo externo la remanencia aumenta hasta alcanzar un valor máximo. Esta remanencia se ha utilizado en el laboratorio para estudiar la mineralogía de nuestra materia arqueomagnética. También puede producirse naturalmente por el impacto de un rayo.

2.3.4. Análisis de direcciones:

Para calcular la dirección promedio de todas las muestras, una vez determinadas todas las direcciones de éstas, se aplica la distribución de Fisher (1953).

La distribución de Fisher es una función de densidad de probabilidad aplicable a las direcciones paleomagnéticas, a cada dirección se le da un peso unidad y es representada por un punto en una esfera de radio unidad. La función de distribución de Fisher $Pda(\theta)$ da la probabilidad por unidad angular de área de encontrar una dirección dentro de un área angular, dA , centrada en el ángulo θ .

El área angular, dA , es expresada en estereorradianes, siendo el área angular total de una esfera 4π estereorradianes. Las direcciones se distribuyen de acuerdo con la función de densidad de probabilidad:

$$Pda(\theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh \kappa} \exp(\kappa \cos \theta)$$

Donde θ es el ángulo desde el valor promedio de la dirección

κ es un parámetro de precisión.

El límite de confianza de la dirección principal es expresado como un radio angular a partir de la dirección principal calculada.

Para un conjunto de N direcciones, el ángulo $\alpha(1-p)$ dentro del cual está la dirección desconocida verdadera con un nivel de confianza de $(1-p)$ viene dado por:

$$\cos \alpha(1-p) = 1 - \frac{N-R}{R} \left(\left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right)$$

La elección más común es tomar un nivel de probabilidad de $(1-p)$ de 0.95, con lo que se obtiene el parámetro α_{95} , círculo de confianza, expresando que existe un 95% de

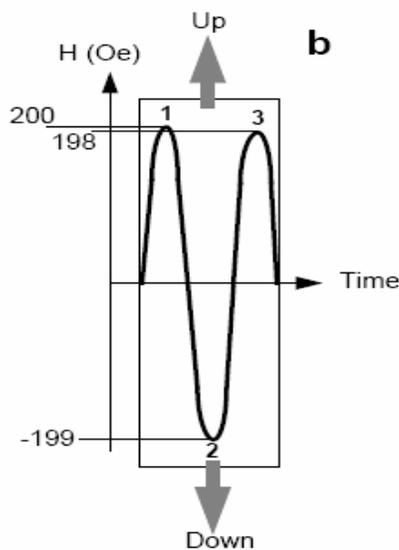
probabilidad de encontrar la dirección verdadera de la distribución dentro de un cono circular de semiángulo α alrededor de la dirección resultante R.

Para valores pequeños de α se puede utilizar la expresión:

$$\alpha_{95} = \frac{140}{\sqrt{kN}}$$

También, aplicaremos el Reversal Test de Mc Fadden & Lowes (1981) donde se comprueba si dos direcciones promedio se aproximan a una dirección común, comparando las propiedades estadísticas de los dos grupos con la del grupo formado por la suma de ellos, utilizando los vectores dirección de cada grupo y el parámetro k.

2.3.4.1. Desimanación progresiva por campos alternos decrecientes:



La función de onda del campo magnético alterno es sinusoidal decreciente linealmente con el tiempo.

Si H_{AF} es el valor máximo del campo desimanador por AF, y el campo magnético en el punto 1 tiene un valor de 20mT, se define arbitrariamente hacia arriba.

Los momentos magnéticos de todos los granos en el espécimen con $h_c \leq 20\text{mT}$ serán forzados a apuntar en la dirección hacia arriba. Posteriormente, el campo magnético pasa a través de cero al máximo del sentido opuesto. Si la magnitud del campo magnético sinusoidal

decrece 1mT cada medio ciclo, el campo en el punto 2 será de 19mT hacia abajo, y todos los granos con $h_c \leq 19\text{mT}$ tendrán el momento magnético colocado hacia abajo. Después del punto 2, el campo magnético vuelve a pasar por cero y se incrementa hasta 18mT, en el sentido positivo, en el punto 3. Ahora todos los granos con $h_c \leq 18\text{mT}$ tienen momento magnético apuntando hacia arriba.

Del punto 1 al 3, el efecto neto es que los granos con h_c en el intervalo 19 a 20mT tienen momento magnético apuntando hacia arriba, mientras que los granos con h_c entre 18 y 19mT tienen momento magnético apuntando hacia abajo. El momento magnético total de los granos de estos dos intervalos de h_c , aproximadamente, se cancelará. Aunque la contribución neta de todos los granos con $h_c \leq H_{AF}$ sea destruida, sólo el NRM llevado por los granos con $h_c \geq H_{AF}$ permanecerá. Debido a la rotación del aparato de desimanación se aplica el campo magnético en todos los ejes del espécimen, el NRM

contenido en todos los granos con $h_c \leq H_{AF}$ se distribuye aleatoriamente dando una componente nula.

La desimanación por AF es efectiva para quitar el NRM secundario y aislar el NRM característico, en rocas con titanomagnetita como mineral ferromagnético predominante.

Al situar una muestra en un campo magnético alterno los momentos magnéticos de los granos, cuyo H_c sea menor que el valor de pico del campo alterno, se orientarán en la dirección del campo aplicado, es decir, se reimanarán.

2.3.4.2. Desimanación térmica del NRM:

En el proceso de la desimanación térmica se calienta un espécimen a una temperatura elevada T_{demag} por debajo de la temperatura de Curie, característica del mineral ferromagnético, posteriormente, se enfría hasta temperatura ambiente en campo cero causando que todos los granos con temperatura de desbloqueo $T_b \leq T_{demag}$ adquieran una magnetización termorremanente en $H=0$, borrando el NRM llevado por estos granos. Es decir, la imanación de todos los granos para los que $T_b \leq T_{demag}$ es aleatoria de componente nula, igual que ocurre en el proceso de desimanación por AF.

2.3.4.3. Adquisición del IRM y desimanación térmica del IRM:

La magnetización remanente isoterma es adquirida por la roca en presencia de un campo magnético a temperatura constante, normalmente a temperatura ambiente.

Se somete al espécimen a un campo magnético externo, se mide la remanencia adquirida y se va aumentando progresivamente en etapas sucesivas el valor de este campo externo, obteniéndose la curva de adquisición de IRM, de gran utilidad para definir la coercitividad de los minerales magnéticos presentes.

Según esta coercitividad los minerales se pueden agrupar en blandos con $H_{cr} = 0-0.1T$, intermedios $H_{cr} = 0.1-0.3T$ y duros $H_{cr} = 0.3-2T$.

La interpretación de la mineralogía ferromagnética puede ser mejorada, considerablemente, a través de la desimanación térmica del IRM adquirido (Lowrie, 1990)

Minerales que tienen coercitividades máximas similares, generalmente, tienen diferentes temperaturas características de desbloqueo. Estas temperaturas se determinan a través de los cambios en la curva de desimanación térmica y con ello se obtiene la identificación mineralógica.

3. Muestreo y preparación de especímenes:

3.1. Muestreo en el campo:

El lugar de muestreo está localizado en el noroeste de Córdoba, en el exterior de la antigua ciudad islámica.



Fig. 1 (a) Mapa de España localizando el lugar de muestreo.



Fig. 1 (b) Plano de Córdoba situando la ubicación del taller de cerámica (yacimento) en el N-E de la ciudad, con el punto amarillo.

Durante la excavación arqueológica se ha encontrado un taller de cerámica con diferentes niveles estratigráficos, formado por 17 hornos de cerámica, de éstos se muestrearon 5, viéndose que los más antiguos estaban en un nivel estratigráfico cerca de las murallas romanas.

De los cinco muestreados, en el nivel estratigráfico superior estaba el horno COO88 de edad desconocida, en otro nivel inferior se encontraban el COO62, COO96 y COOXX con una edad entre el S. XII – S. XIII, construidos a base de arcilla quemada. Más profundamente estaba situado el horno COO90 perteneciente al S. X, donde también se encontraron restos de cerámica.

En particular nuestro horno COO62, es de cocción de cerámica con forma ovalada de 2.5 m de diámetro y 1.95 de altura, de tres niveles. Se ha encontrado en buen estado de conservación, aunque por su apariencia se puede determinar que ha tenido numerosos usos y reparaciones.

Las muestras obtenidas del horno COO62 provienen de las paredes formadas por arcilla bien calentada y con seguridad de estar bien in-situ. No hay evidencia visual de que el calentamiento haya sido diferente en distintas partes del horno.

Una vez elegido el horno se procede a la extracción de las muestras de mano (bloques horizontales), se eligen de forma que se encuentren a diferentes alturas dentro las paredes del horno y a distintos lados. Antes de proceder a la extracción, se coloca en la parte superior de cada bloque una placa horizontal de escayola, en la que se marca su orientación respecto del Norte y del Norte magnético (brújula solar y brújula magnética).

Cuando son extraídas del horno se envuelven en escayola, para evitar la rotura durante su traslado y posterior tratamiento.

A partir de los 19 bloques recibidos se prepararon las muestras y los especímenes para su posterior análisis.

3.2. Preparación de especímenes arqueomagnéticos:

Los bloques 1 y 16 parecen muy frágiles y poco compactos por lo que se les aplicó un consolidante para conseguir una mayor unión de las partículas y evitar su rotura al cortarlos, con la sierra, en forma de cubos. El proceso de aplicación del consolidante consiste en introducir silicato de sodio en un recipiente de plástico y, posteriormente, sumergir en él los dos bloques, dejándolo actuar durante 48 horas. A continuación, se retiraron del consolidante para la realización del proceso de secado durante una semana; a partir de ese momento, están perfectamente consolidados para proceder a su corte. El consolidante utilizado fue silicato de sodio por ser térmicamente estable y no magnético.

Para el estudio de las direcciones y el análisis más profundo de la mineralogía se cortan especímenes en forma cúbica.

Antes de proceder al corte de las muestras, con la sierra, se mide el ángulo respecto a la orientación solar y al campo magnético.

La preparación en cubos se realiza con un corte perpendicular a la cara orientada del bloque, (esta cara orientada la tomamos como horizontal) y a partir del corte se mide el ángulo del norte magnético con la dirección de corte, obteniéndose el valor del azimut de cada muestra, después se cortan paralelamente en láminas de 23mm y se marcan en la dirección del azimut medido, finalmente, en cada lámina se realiza otro corte perpendicular para obtener los cubos.

En todos estos especímenes el plunge es de 90°, porque el eje vertical del cubo es perpendicular a la superficie del bloque donde se ha colocado la escayola, plano horizontal. Se necesitan estos parámetros para poseer la información sobre la dirección de las muestras refiriéndola respecto al sistema geográfico.

Se preparan al menos dos especímenes por bloque, uno de ellos para medir el NRM y desimanar por AF (ChRM) y el otro para la desimanación térmica TRM.

Para la medida de la intensidad inicial de NRM se han utilizado 21 especímenes, de los cuales 19 se han desimanado por campos alternos, y los otros 2 por térmica.

3.3. *Submuestreo para el estudio de la mineralogía magnética:*

Para estudiar la mineralogía a través de la medida de la histéresis magnética se toman de cada bloque trozos pequeños, como pueden ser las esquinas, se machacan hasta conseguir un polvo granulado y se introducen en una cápsula de gelatina, preparándose una cápsula por bloque. Posteriormente, se pesa una cápsula vacía y la cápsula con la muestra, determinando el valor de la masa de cada muestra y así se normalizan los valores de imanación por unidad de masa.

4. Datos experimentales

Todos los experimentos han sido realizados en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Facultad de Ciencias Físicas y del C.A.I. de Técnicas Físicas.

4.1. *Metodología:*

4.1.1. *Susceptibilidad e intensidad de NRM inicial:*

En este caso, se utilizan los especímenes midiendo, en primer lugar, la susceptibilidad de cada uno con el KLY-3 Kappabridge, Magnetic Susceptibility and Anisotropy Meter, (Advanced Geoscience Instruments Company, Inc.); posteriormente, se mide el NRM inicial con el 760 Superconducting Rock Magnetometer (2G –Enterprises), con dichos valores se calcula el coeficiente de Koenigsberger que permite estimar la relación entre la magnetización remanente y la magnetización inducida.

Aplicando la relación entre la intensidad de NRM inicial y la susceptibilidad, se obtiene el coeficiente de Koenigsberger, Q , relación entre la magnetización remanente y la magnetización inducida.

$Q = \frac{NRM \left(\frac{A}{m} \right)}{\chi H}$ es un valor adimensional.

Donde χ es la susceptibilidad

H el campo geomagnético local. La variación del campo asumido tiene valores de

$30-90 \frac{A}{m}$, para los cálculos se toma el valor de $39.8 \frac{A}{m}$.

El coeficiente de Koenigsberger se usa como medida de la estabilidad, indicando la estabilidad de la remanencia de la muestra.

Para valores: $10 < Q < 100$ los granos son monodominios.

$Q \approx 1$ los granos son multidominios

$Q > 100$ pertenece a una remanencia isotérmica natural, como el impacto de un rayo.

4.1.2. Desimanación progresiva por campos alternos decrecientes:

Para desimanar, por campos alternos, los especímenes elegidos como piloto se utiliza el 760 Superconducting Rock Magnetometer (2G –Enterprises), aplicando los pasos de 0mT (intensidad inicial del NRM) con un incremento de 5mT hasta 30mT. A continuación, se incrementa el campo de 10 en 10mT hasta un máximo de 120mT.

Para el resto de especímenes se realizan los siguientes pasos: 0; 5; 10; con incrementos de 10mT hasta 60mT; y por último aumentando de 20mT hasta un campo máximo de 100mT.

A partir de estos resultados se determinan los diagramas de Zijderveld (1969) y se calculan las direcciones características.

4.1.3. Desimanación térmica del NRM:

El equipo utilizado para el calentado de los especímenes ha sido el TSD1 Thermodemagnetizer (Schönsted). A continuación de cada calentamiento se mide el NRM con el 760 Superconducting Rock Magnetometer (2G –Enterprises).

Los pasos de calentamiento son los mismos realizados en la desimanación térmica del IRM (se explican en el siguiente apartado).

Con los valores obtenidos se pueden realizar diagramas de Zijderveld (1969) para la desimanación térmica y calcular las direcciones.

4.1.4. Adquisición del IRM y desimanación térmica del IRM:

La adquisición del IRM se realiza hasta un campo máximo de 2 T, posteriormente se aplica la reimanación en tres ejes perpendiculares, consistente en remagnetizar fracciones de diferentes coercitividades de IRM en campos sucesivamente menores a lo largo de tres direcciones ortogonales; finalmente, se realiza la desmagnetización térmica de cada una de las componentes ortogonales del IRM, que serán representadas separadamente.

En esta parte se aprovechan algunos de los especímenes arqueomagnéticos ya utilizados en la desimanación por campos alternos.

La adquisición del IRM se realiza con el aparato IM-10-30 Pulse Magnetizer (ASC Scientific), la medida del IRM con el Molspin Spiner Magnetometer (Molspin Limited), el calentamiento con TSD1 Thermodemagnetizer (Schönsted) y la medida de desimanación térmica mediante el aparato 760 Superconducting Rock Magnetometer (2G –Enterprises).

Los pasos utilizados en la adquisición del IRM son: 30; 60; 100; 150; 200; 300; 400; 600; 800; 1000; 1500 y 2000 mT.

Para la reimanación en los tres ejes perpendiculares se introducen los campos: 2 T en el eje X, 0.3 T en el eje Y y 0.1 T en el eje Z.

Los pasos que se emplean en la desimanación térmica son 20; 80; 120; 160; 200; 300; 350; 400; 500; 540; 580; 610; 650; 690° C.

4.1.5. Curvas de histéresis, adquisición IRM, desimanación por campo inverso:

Las curvas de histéresis permiten obtener una mayor información sobre la mineralogía de las muestras estudiadas.

Las muestras contenidas en las cápsulas de gelatina se miden con el aparato Variable Force Translation Balance (VFTB) (Petersen Instruments) realizando pasos, de un incremento cada vez mayor, desde 30 Oe hasta alcanzar un campo máximo de 9000 Oe. Con este aparato se obtienen las curvas de histéresis, de adquisición de remanencia (IRM)

y de desimanación por campo inverso, con las que se determinan los parámetros de histéresis M_s , M_{rs} , H_c y mediante la curva de IRM se obtiene el parámetro H_{cr} .

Se ha empleado la misma muestra para la realización de los tres experimentos, llevándose a cabo por el siguiente orden: adquisición de IRM, ciclo de histéresis y desimanación por campo inverso.

Los pasos realizados en la adquisición del IRM son: 30 Oe; 60; 100; 200; 300; 500; 1000; 2000; 3000; 5000; 7000; 9000 Oe (900 mT), valor del campo máximo.

En las curvas de histéresis se realizan mediante ciclos desde 10 Oe hasta un campo máximo de 9000 Oe (900mT), disminuyendo el valor del campo, de forma que pasa por 0 Oe, llegando al campo mínimo de -9000 Oe (-900 mT), regresando nuevamente a 0 Oe y volviendo de nuevo al campo máximo, 9000 Oe (900 mT).

La desimanación por campo inverso parte de 0 Oe va descendiendo, progresivamente, la intensidad del campo magnético hasta llegar al valor mínimo de campo, aproximadamente, -9000 Oe (-900mT).

4.2. Resultados:

4.2.1. Estudio de la dirección del NRM inicial:

Se mide el NRM de todos los especímenes, cada uno de un bloque diferente, incluyendo el 3D y el 4C, medidos por desimanación térmica en vez de por desimanación de campos alternos y teniendo en cuenta que la 1A y la 16A han sido consolidadas.

En la Fig.3(a) se representan todos los valores de declinación e inclinación de los 21 especímenes aplicando la estadística de Fisher (1953). Obteniéndose una **declinación promedio $D=11.0$** y una **inclinación promedio $I=41.4$** , un valor de $\alpha_{95}=2.0$, $k=241.8$, valores considerados buenos estadísticamente.

Se observa que todas las direcciones están muy bien agrupadas entorno de la dirección promedio, lo que implica una señal estable y una estructura sencilla del NRM.

En la Fig. 3(a) cada punto sólido representa la dirección inicial de NRM (de la intensidad inicial) de cada espécimen determinada a partir de la medida del NRM. Se observa que todas las direcciones están muy bien agrupadas, situadas en el N-E, deduciéndose que la estructura es muy sencilla y sólo ha sufrido un TRM.

COO62

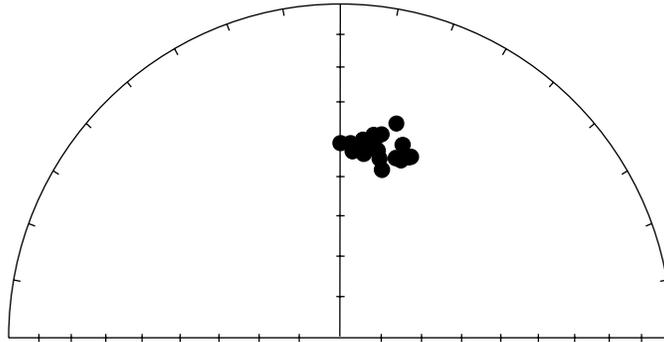
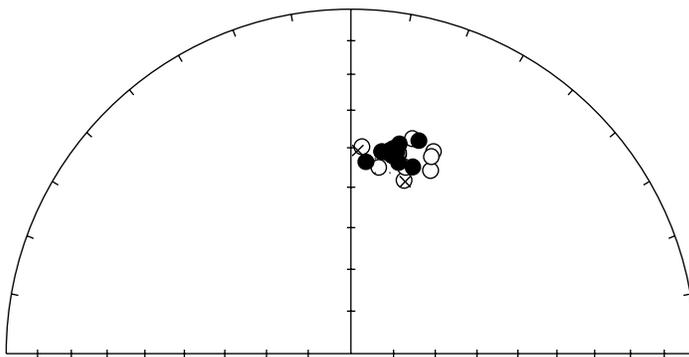


Fig. 3(a). Dirección inicial del NRM.

COO62



- Dirección característica especímenes grupo 1.
- Dirección característica especímenes grupo 2.
- x Dirección especímenes consolidados.

Fig. 3(b). ChRM grupo1, grupo2 y consolidadas (1A, 16A).

COO62

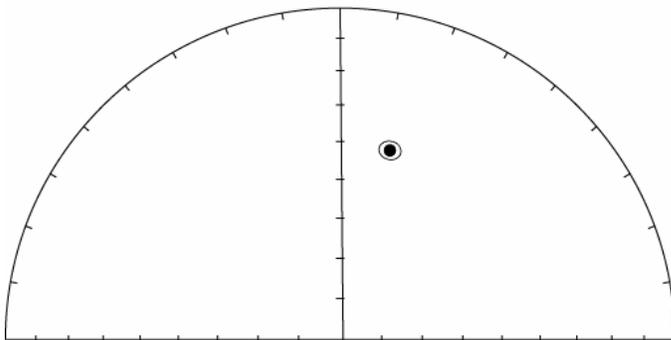


Fig. 3(c) Dirección promedio (promedio 3, promedio4 y todos los AF).

- Dirección promedio.
- α_{95}

COO94

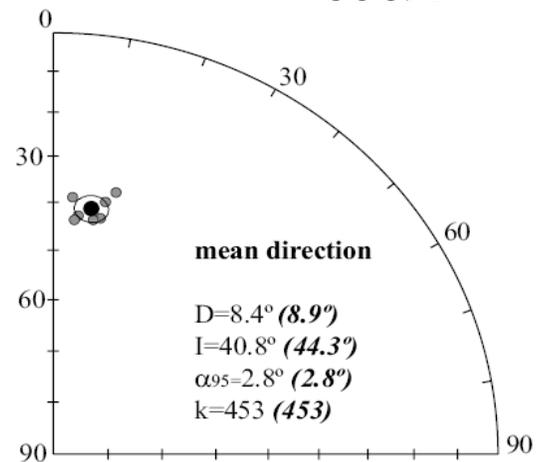


Fig. 3 (d) Dirección promedio de la estructura COO94.

- Dirección promedio.
- Dirección característica del ChRM.

4.2.2. Estabilidad de la desimanación por campos alternos (AF):

Se realiza la desimanación por AF hasta un campo máximo de 100 ó 120 mT, se hace un estudio de la caída de la intensidad de la imanación (Decay) y se han encontrado dos grupos respecto a la estabilidad del “medium destructive Field” mdF (que es el campo necesario para desimanar el 50% de su imanación total), que poseen características diferentes, uno de alto valor de mdF y bajo valor de NRM al que nombramos como grupo 1, y el otro de bajo mdF y alto NRM al que se le denomina grupo 2.

Los especímenes que pertenecen al **grupo 1** son:

4B, 5C, 6B, 7C, 9A, 10A, 11B, 15A, 18B

y los del **grupo 2** son:

1A, 2C, 3B, 8A, 12A, 13B, 14C, 16A, 17A, 19C.

El grupo de alto valor de mdF tiene valores bajos de intensidad de NRM y baja susceptibilidad, mientras que el grupo de bajo mdF (medium destructive Field) tiene alta intensidad de NRM y alta susceptibilidad.

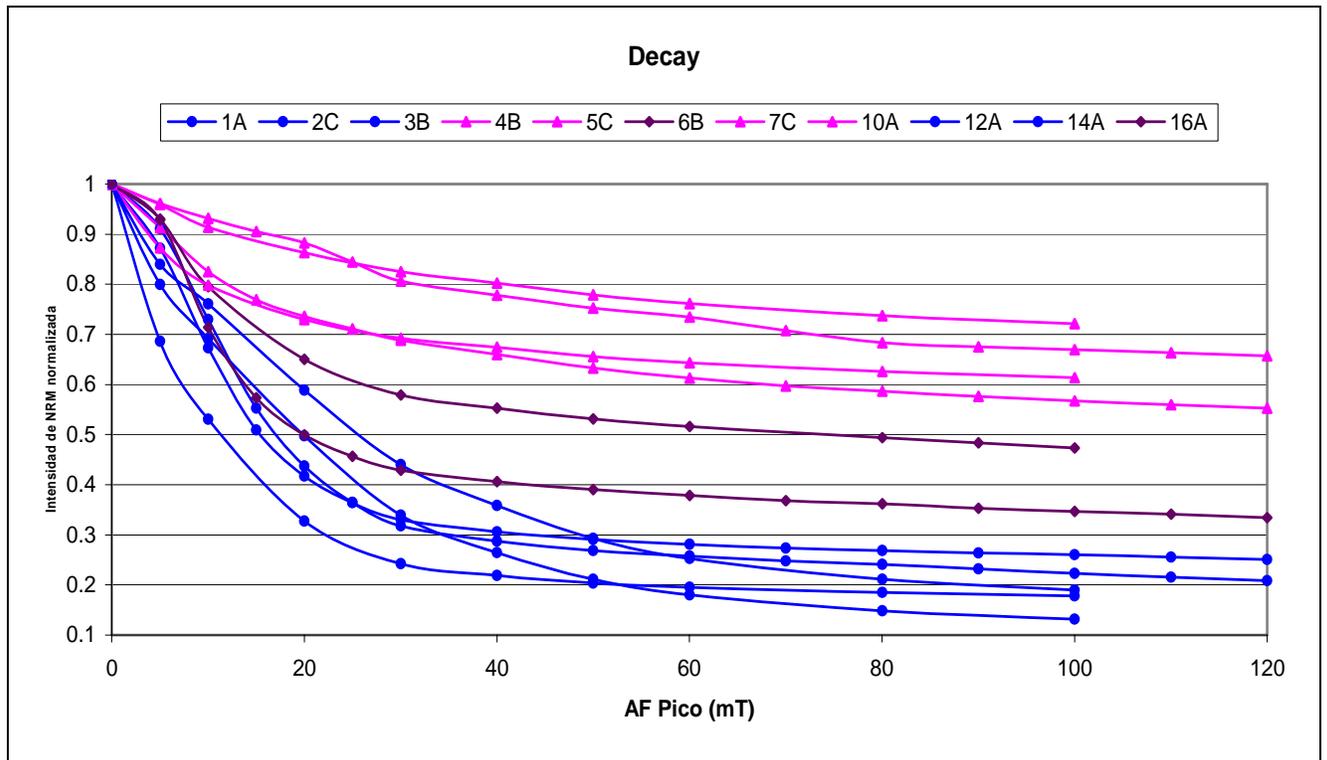


Fig. 4. Decaimiento de la intensidad del NRM normalizado para los especímenes más representativos de los dos grupos, en rosa el grupo 1 y en azul el grupo 2.

Los especímenes del grupo 2 tomados como más representativos: 1A, 2C, 3B, 12A, 14C, contienen solamente el 20% de su imanación inicial después de aplicarles el campo máximo.

Por otra parte, los especímenes del grupo 1 seleccionados como más característicos: 4B, 5C, 7C, 10A; presentan unas intensidades muy elevadas, incluso a 100-120 mT (campo máximo), manteniendo entre un 55% y un 80% sin desimanar. No es posible determinar con exactitud el valor de mdF, ya que muchos de los especímenes no han llegado a adquirirlo. Por tanto, será necesaria la desimanación térmica para observar esta parte que ha quedado sin desimanar.

Los especímenes 6B y 16A, representados en rosa oscuro en la Fig.4, poseen valores intermedios entre los de los especímenes tomados como característicos de ambos grupos.

4.2.3. Desimanación progresiva por campos alternos decrecientes:

Se realiza la desimanación hasta un campo máximo de 100 ó 120 mT, se calculan los valores de declinación e inclinación de cada espécimen (uno de cada bloque, en total 19), aplicando la estadística de Fisher (1953), obteniendo la representación gráfica de la Fig. 3(b).

El círculo sólido representa la dirección característica de cada espécimen del grupo 1, el círculo sin rellenar la de los especímenes del grupo 2, y la cruz la de los especímenes consolidados.

Observamos que las direcciones de todos ellos caen dentro de una nube de puntos prácticamente indistinguibles, manteniendo la misma dirección característica. Pudiéndose concluir que las muestras 1A y 16A, a las que se les ha aplicado el consolidante, no introduciendo alguna diferencia mineralógica. Además, se aprecia que tanto las direcciones de los especímenes del grupo 1, como los del grupo 2 están entremezcladas dentro de la nube de puntos. Determinándose con mucha más precisión al aplicar el "Reversal Test" de Mc Fadden & Lowes (1981). Observándose que las direcciones de los dos grupos se solapan, ya que el promedio de un grupo cae dentro del error del otro, concluyéndose que la dirección promedio del grupo 1 es indiferente de la promedio del grupo 2, las poblaciones tienen las mismas propiedades estadísticas y son indistinguibles.

Por tanto al tomar todos los especímenes de los dos grupos juntos realizando el promedio de todas las direcciones no se comete ningún error.

4.2.3.1. Obtención de la dirección arqueomagnética:

Se utilizan todas las direcciones de cada espécimen. Haciendo primeramente el promedio de las direcciones entre los especímenes 3B y 3D, obteniéndose la dirección promedio del espécimen 3, e igualmente con el 4B y 4C, la dirección promedio del espécimen 4.

Con estas dos direcciones promedio y las restantes 17 direcciones de los demás especímenes, se calcula la dirección promedio final, la utilizada para calcular la dirección arqueomagnética, que será la promedio corregida por declinación y a partir de ese valor hacer la datación.

En la figura 3(c), se representa la dirección promedio mediante un círculo con punto, con valores de **declinación D=13.4** e **inclinación de I=40.8**.

4.2.3.2. Direcciones del ChRM:

Los valores obtenidos de la desimanación por campos alternos hasta un máximo de 100-120 mT, se representan mediante los diagramas de Zijderveld Fig. 5(a), Fig. 5(b) y se analizan las direcciones características.

Se aísla una componente estable, bastante grande, comprendida entre los campos 10 mT-20 mT y el campo máximo aplicado (120 mT).

La imanación existente entre 0 y 10 mT-20 mT es una componente inestable pequeña, posiblemente, debida a la presencia de granos muy finos, o gordos que relajan muy rápidamente.

El estudio de la dirección característica de cada grupo:

En el espécimen 10A perteneciente al grupo 1 de alto mdF y bajo NRM, se observa que la componente aislada se aproxima a una línea recta, aunque permanece una gran proporción sin desimanar y no se sabe, exactamente, si esta parte corresponde a la misma componente que ha sido aislada. Por tanto, se piensa que al tender linealmente hacia el origen, exista una sola componente y la parte sin desimanar lleve la misma dirección que la parte desimanada. Se realizará la comprobación mediante desimanación térmica Fig. 5(b).

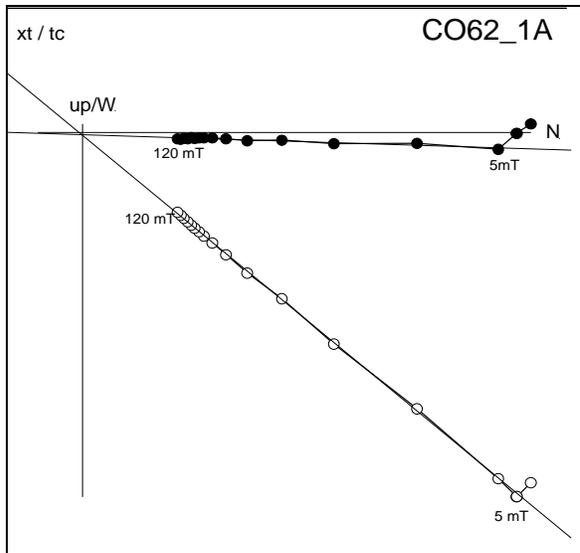


Fig. 5(a) diagrama de Zijderveld para la desimanación por AF del espécimen 1A
 ● Proyección plano horizontal (N-W)
 ○ Proyección plano vertical (N-arriba)

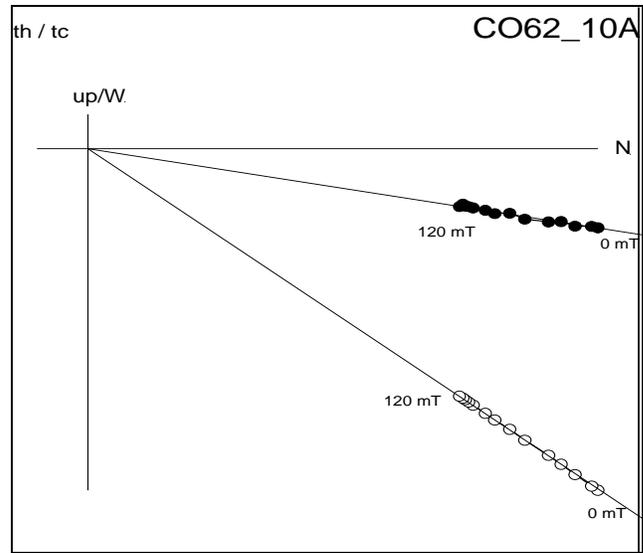


Fig. 5(b) diagrama de Zijderveld para la desimanación por AF del 10A

Por otra parte el espécimen 1A, del grupo 2, bajo mdF y alto NRM, según la Fig. 5 (a)

La componente aislada se representa por una línea recta que pasa por el origen, manteniendo muy poca imanación. En este caso, se puede asegurar que existe una única componente. Posteriormente, se realizará la desimanación térmica para llevar a cabo un estudio comparativo con el grupo 1.

4.2.4. Estabilidad de la desimanación térmica del NRM:

Estudio del decaimiento de intensidad con la temperatura:

El espécimen 4C tiene temperaturas de desbloqueo 200° C y 650° C, como se observa en la Fig. 6. Por otro lado, el espécimen 3D, perteneciente al grupo2, presenta una temperatura de desbloqueo muy diferente, 540° C. Introduciéndose así, más características sobre el comportamiento de los grupos 1 y 2.

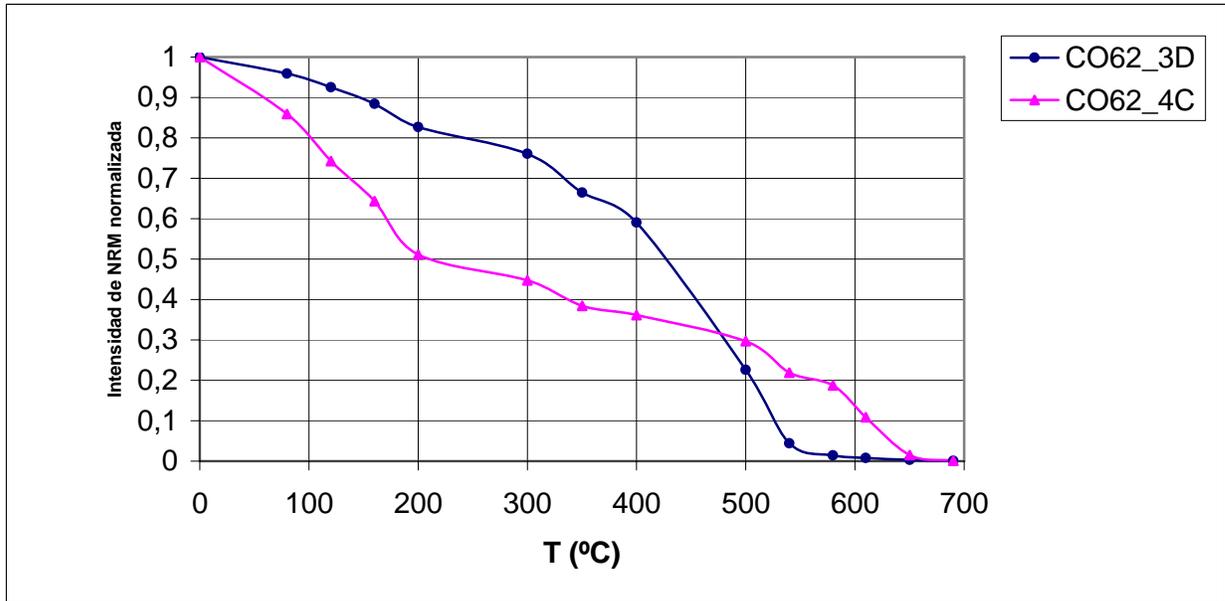


Fig. 6. Curvas de desimanación térmica para los especímenes 3D (grupo2), 4C (grupo1)

Para estudiar esta característica, con más detalle, se analizan por desimanación térmica los especímenes 3D, perteneciente al grupo 2 y el 4C perteneciente al grupo 1.

4.2.5. Desimanación térmica:

Obtención de los diagramas de Zijderveld (1969) para los especímenes en los que se ha realizado la desimanación térmica, Fig.7 (a) y Fig. 7 (b):

En la desimanación térmica del espécimen 3D, hay una parte de ruido en la zona inicial, que puede ser debido a la viscosidad adquirida durante su almacenamiento en el laboratorio, pero a partir de la temperatura de 160° C se observa linealidad hacia el origen, corroborando la existencia de una sola componente como se propuso en el estudio del AF.

Para el espécimen 4C, se observa un grado mayor de ruido, pudiéndose aproximar por una línea recta que tiende al origen. Para asegurarse de la bondad de esta aproximación se observa la imagen en la proyección estereográfica, Fig. 3(b). Representación del vector resultante de las dos componentes de la dirección, observándose una nube de puntos con movimiento aleatorio alrededor de un punto, lo que indica que se ha aislado una componente estable, con un poco más de ruido que la del grupo 2.

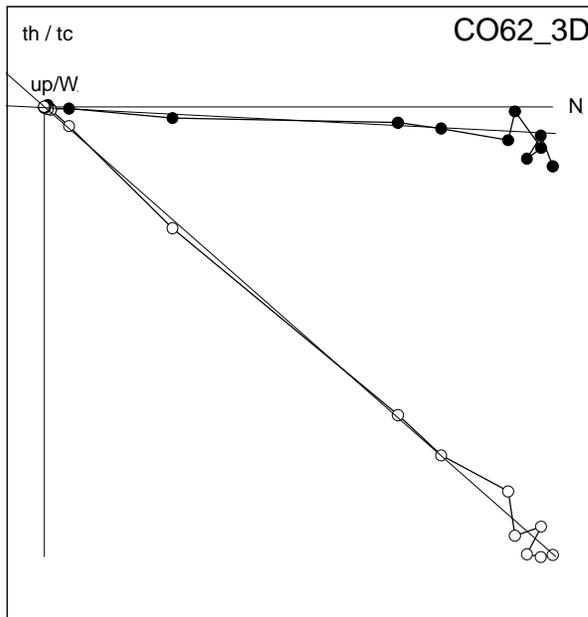


Fig. 7(a) Diagrama de Zijderveld de la desimanación térmica para la 3D, del grupo2

- Proyección plano horizontal (N-W)
- Proyección plano vertical (N-arriba)

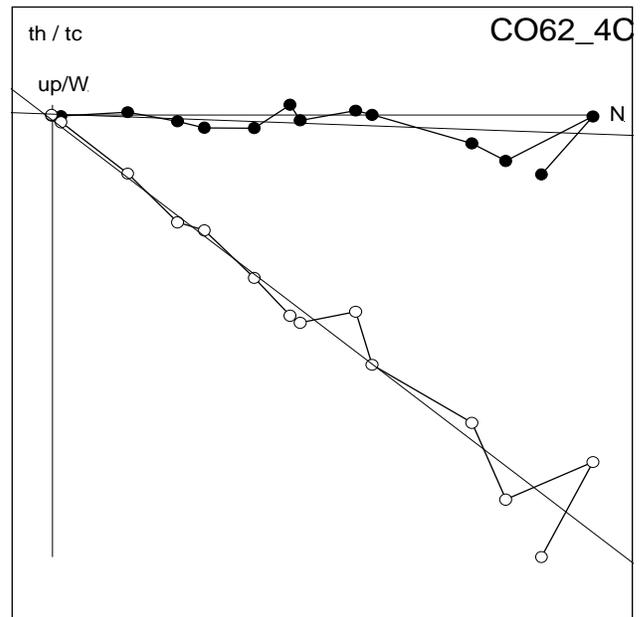


Fig. 7(b) Diagrama de Zijderveld de la desimanación térmica para la 4C, del grupo1

El ruido que aparece al realizar la desimanación térmica y no aparece, a penas, al realizar la desimanación por campos alternos, es debido a los errores de colocación de la muestra en el criogénico en el momento de realizar la medida del NRM. En la desimanación térmica, después del calentamiento a cada temperatura, hay que colocar el espécimen dentro del criogénico para medir el NRM, mientras que, en la desimanación por campos alternos se coloca una vez y se realiza todo el proceso continuamente, reduciéndose los errores de posicionamiento dentro del portamuestras.

También, puede ser debido a una contaminación viscosa entre el proceso de desimanación térmica y la realización de la medida de NRM.

Otra posible causa puede ser un campo existente en el interior del horno que induce un TRM en el interior del espécimen.

4.2.6. Cálculo de direcciones arqueomagnéticas:

Teniendo en cuenta la componente estable que hemos aislado, que es la adquirida en la presencia del campo magnético, se realiza un ajuste por mínimos cuadrados utilizando el método de Kirschvink J. (1980), así se aísla la dirección característica promedio del sitio

en estudio. Observándose una declinación $D=13.4$, inclinación $I=40.8$, $\alpha_{95}=2.5$, $k=188.5$, $N=19$.

	D	I	α_{95}	k	r	N
NRM	11.6	41.2	2.2	241	18.90	19
ChRM Grupo 1	12.0	40.1	2.7	368	8.98	9
ChRM Grupo 2	14.9	41.4	4.2	132	9.93	10
Dirección promedio	13.4	40.8	2.5	189	18.91	19
Dirección arqueomagnética	10.8	40.8	2.5	189	18.91	19
Dirección Relocalizada VGP	11.4	44.3	2.5	189	18.91	19

Tabla 2. Direcciones resultantes donde D=declinación, I=inclinación, α_{95} =semiángulo de confianza del 95%, k=parámetro de precisión, r=vector dirección resultante, N= número de muestras.

Se aprecia que el grupo 1 y el grupo 2 tienen, aproximadamente, la misma dirección promedio, aunque en el grupo 2 se tiene menos confianza de haber aislado bien la componente estable, pero viendo que las direcciones coinciden, se concluye que la componente del grupo 2 ha sido bien aislada. Haciendo el estudio del Reversal Test de Mc Fadden & Lowes (1981) se observa que los α_{95} son indistinguibles aunque el α_{95} (grupo 2)=4.2 sea superior al valor de α_{95} (grupo 1)=2.7, debido a la peor definición del ChRM al haber desimanado un porcentaje mucho más pequeño de la componente estable, por ello se define con menor precisión la dirección característica. Por otra parte, se aprecia que el consolidante no afecta a la dirección promedio de todas las muestras.

4.2.7. Susceptibilidad e intensidad de NRM inicial:

El rango de valores de la susceptibilidad está comprendido entre el valor mínimo de $6.83 \cdot 10^{-4}$ (SI) que pertenece al espécimen 10A y el valor máximo de $6.82 \cdot 10^{-3}$ (SI) del espécimen 1A.

Los valores de intensidad de NRM presentan intensidades comprendidas entre la imanación mínima, $4.27 \cdot 10^{-1}$ A/m, del espécimen 5C y la máxima, 3.61 A/m, perteneciente al espécimen 17C.

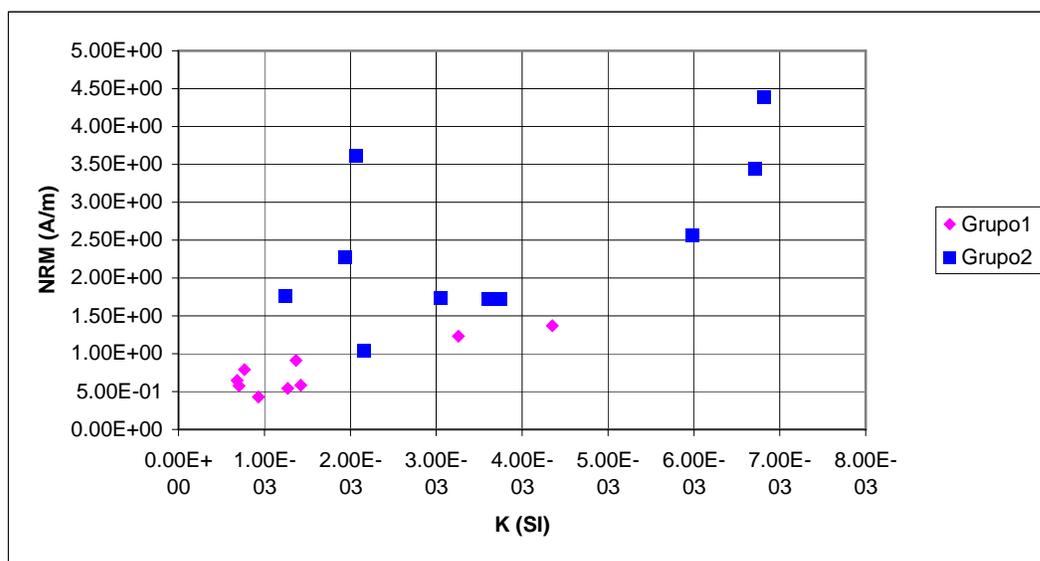


Fig. 2 Relación entre la susceptibilidad k (SI) y el NRM(A/m)

En la gráfica, Fig.2, se obtienen los valores del coeficiente de Koenigsberger, comprendidos entre 8 valor más bajo (espécimen 6B) y 44 el valor más alto (espécimen 17C). Observándose que los valores de Q pertenecen al intervalo $8 < Q < 44$, que es el correspondiente a los granos monodominio, lo que nos indica la estabilidad del NRM.

Los valores observados en la gráfica, Fig. 2, están bastante alineados y se aproximan a una recta de pendiente positiva, coeficiente de Koenigsberger.

4.2.7. Curvas de histéresis, adquisición de IRM, desimanación por campo inverso:

En la Fig. 8, se observan los *ciclos de histéresis* obtenidos.

Las muestras 2C y 1A presentan curvas estrechas, de alta coercitividad, que no llegan a saturarse. Sin embargo, las muestra 4B, y 16A están representadas por curvas más anchas, con contribución de materiales de alta coercitividad, obteniéndose una forma de cinturón de avispa claramente diferenciada, lo que implica una mezcla de minerales o fases magnéticas.

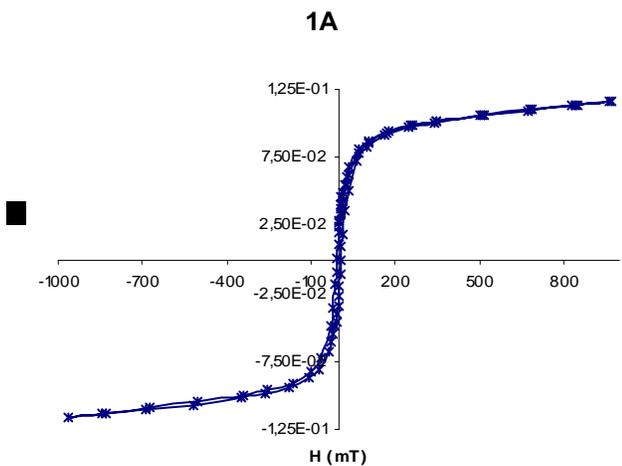
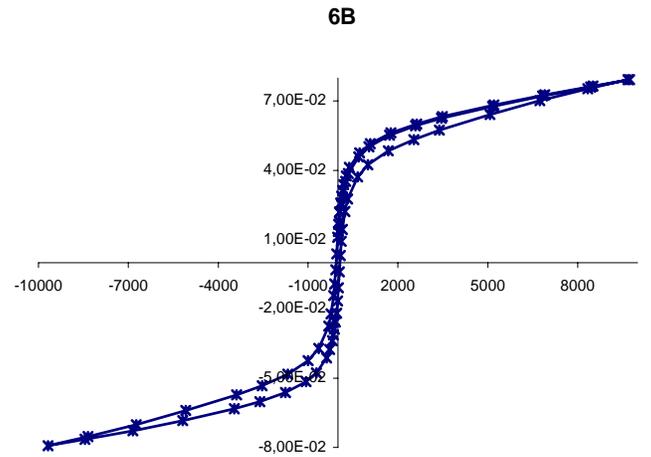
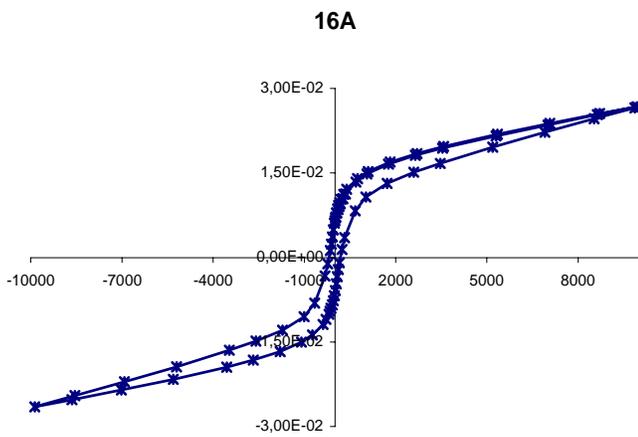
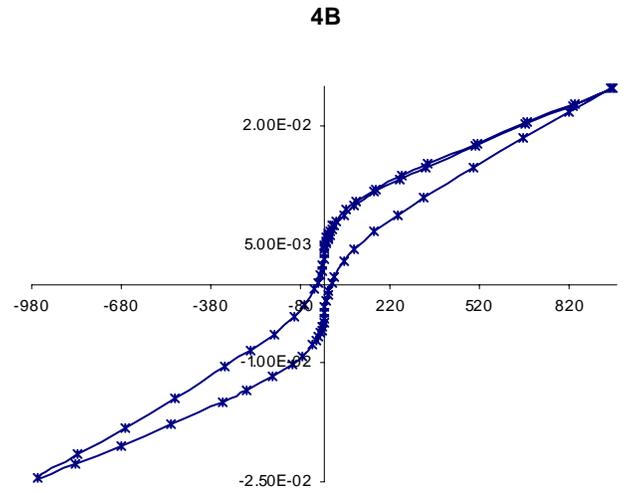
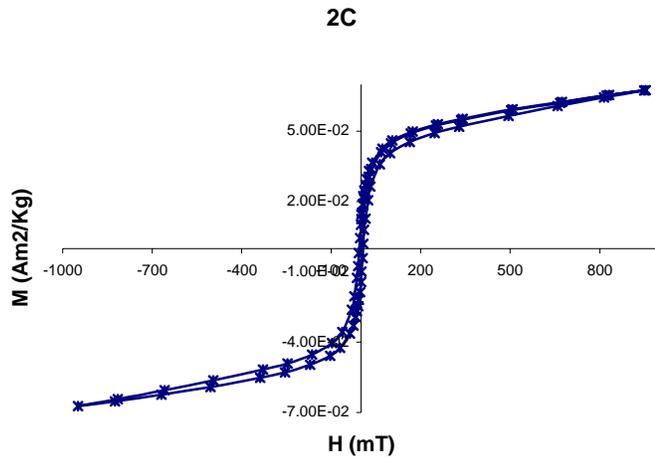


Fig. 8 Curvas de histéresis de las muestras 2C, 16A, 1A (grupo 2) y las 4B, 6B (grupo 1)
 En el eje de abscisas se representa el campo aplicado (H) en mT
 en el eje de ordenadas la imanación (M) adquirida en Am²/Kg

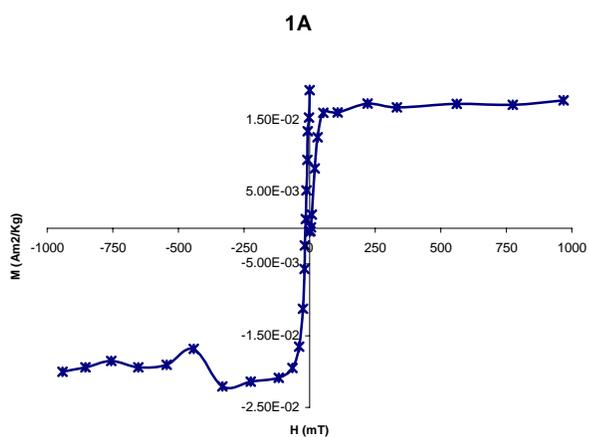
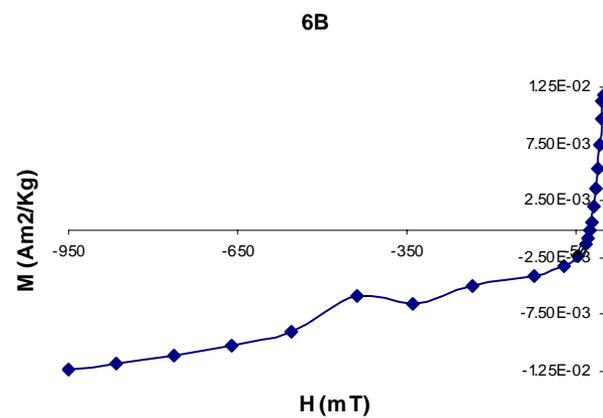
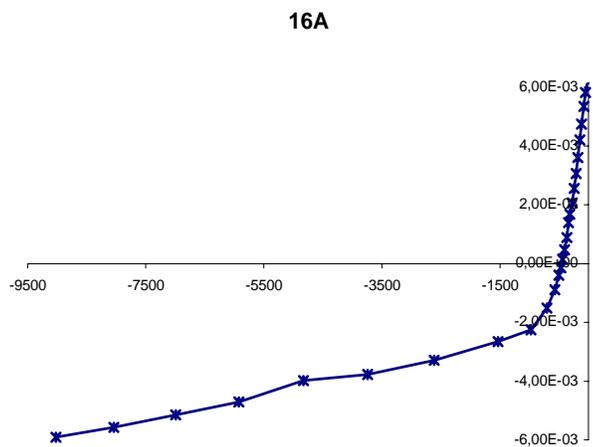
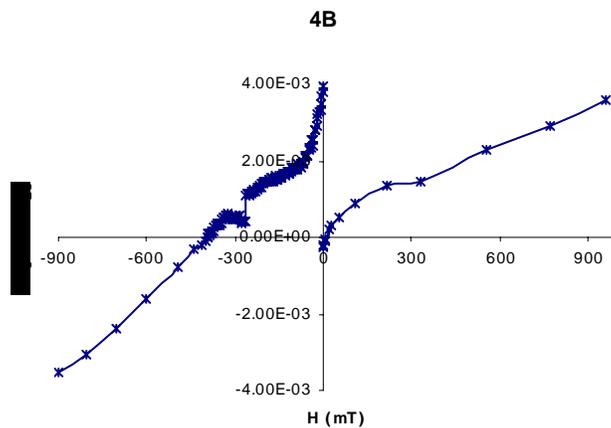
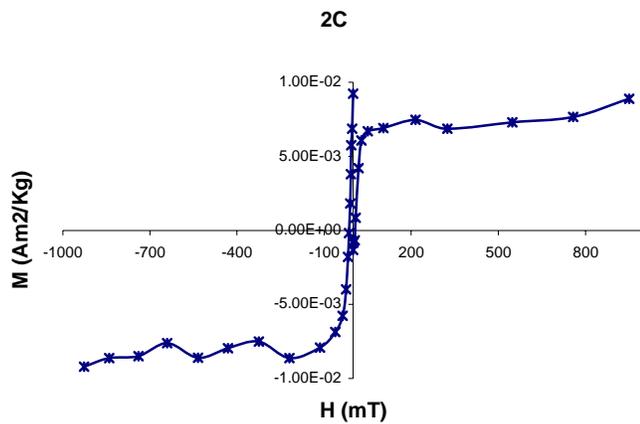


Fig. 9 Curvas de los procesos de adquisición y desimación de las muestras 2C, 16A, 1A (grupo 2) y las 4B, 6B (grupo 1). En el eje de abscisas se representa el campo aplicado (H) en mT y en el eje de ordenadas la imanación (M) en Am²/Kg.

En la Fig. 9, se observa que las curvas obtenidas en la adquisición del IRM y la desimanación por campo inverso para las muestras 2C y 1A, (curvas de histéresis anchas) cuando adquieren más IRM es a campos bajos y mientras que a campos altos sólo adquieren una pequeña cantidad, es decir, a partir de 200-300 mT la adquisición es mucho menor, dando así un valor pequeño de Hcr.

Sin embargo, las muestras 4B y 16A, que tienen una curva de histéresis más estrecha, poseen una fracción de alta coercitividad y alto valor de Hcr.

Se obtienen las mismas conclusiones de los valores de la desimanación.

El resto de muestras tienen valores intermedios entre los descritos anteriormente, es decir, tanto en coercitividad como en Hcr.

El caso de la muestra 1B, es exactamente igual al de la 2C, ya que las dos son del grupo 2, confirmándose de nuevo que el consolidante aplicado a la muestra 1B no afecta en los resultados. Al igual que ocurre con la 16A.

Estudiando todos los resultados de histéresis, adquisición de IRM y desimanación por campo inverso, para todas las muestras, se observa que hay una mezcla de fases de alta y baja coercitividad. Cuanto mayor es la coercitividad más marcada es la forma de cinturón de avispa en las curvas de histéresis, más adquisición a campos altos, lo que conlleva menos saturación.

Con respecto a la mineralogía, los materiales de baja coercitividad implican la presencia de magnetita o maghemita, y los materiales de alta coercitividad, la presencia de goetita o hematita.

4.2.6. Adquisición de IRM y desimanación térmica del IRM:

Para mejorar la interpretación de la información obtenida de las curvas de histéresis, la adquisición del IRM y la desimanación, de las que no se había obtenido una solución única, se estudia la temperatura de desbloqueo asociada a las fases de alta y baja coercitividad, utilizando los especímenes ya desimanados por AF.

El estudio del IRM se realiza en los especímenes 7C, 12A y 16A, de donde los dos últimos son del grupo 2, y el espécimen 7C del grupo 1.

En la Fig. 10, se representan las curvas obtenidas por adquisición de IRM para cada espécimen, aplicando los campos de 30; 60; 100; 150; 200; 300; 400; 600; 800; 1000; 1500 y 2000 mT.

Se observa que para el espécimen 16A el IRM es más intenso que para el 12A, y mucho más que para el 7C, siendo este último el más débil de los tres. Condición ya comprobada al estudiar la división de grupos según sus valores de mdF y de NRM.

Las curvas de adquisición de IRM son crecientes con pendiente positiva muy pronunciada hasta 100 mT. La pendiente se suaviza, ligeramente, hasta llegar a 300 mT siendo cada vez menos pronunciada y llegando a tender casi a la horizontal. Lo que sugiere que hay dos fases magnéticas diferentes, una de alta coercitividad entre 0.3-2T, otra de baja coercitividad, que es la parte más importante, y hay una parte intermedia 0.1-0.3T, donde se da un solapamiento entre las dos fases anteriores.

Por ello se utilizan estos valores a la hora de introducir los campos perpendiculares en los tres ejes, consiguiendo así aislar las fases.

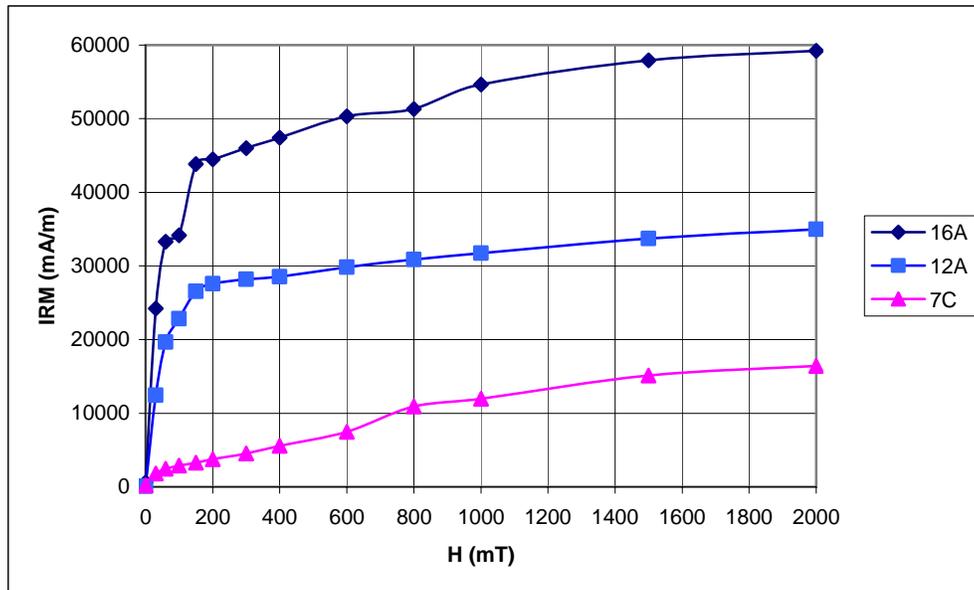


Fig. 10 Adquisición de IRM hasta campo máximo de 2T.

Los valores elegidos para aplicar el campo imanador en los 3 ejes XYZ en cada espécimen, se deciden en base a la curva de adquisición de IRM, Fig. 10, en la que se observa que gran parte de la imanación se adquiere entre 100mT y 300mT, por este motivo introduce un campo imanador de 2000 mT en el eje X, otro 300 mT en el eje Y y otro de 100 mT en el eje Z, y así poder estudiar en detalle estos rangos de la imanación.

En la gráfica, Fig. 10, se observa que existe una cantidad variable de alta coercitividad y una componente que no satura a 2T.

La desimanación térmica del IRM:

Después de introducir el campo imanador en los tres ejes, se calientan las muestras a diferentes temperaturas y se mide su IRM. Obteniéndose las curvas de desimanación térmica, Fig. 11(a), Fig. 11(b), Fig. 11(c).

En la Fig. 11(a), el cuadrado negro es el vector total de la intensidad al volver a reproducir la medida después de haber calentado a 700° C, la cruz rosa oscuro es la intensidad total, obtenida al sumar las tres fases de diferentes coercitividades en la medida inicial.

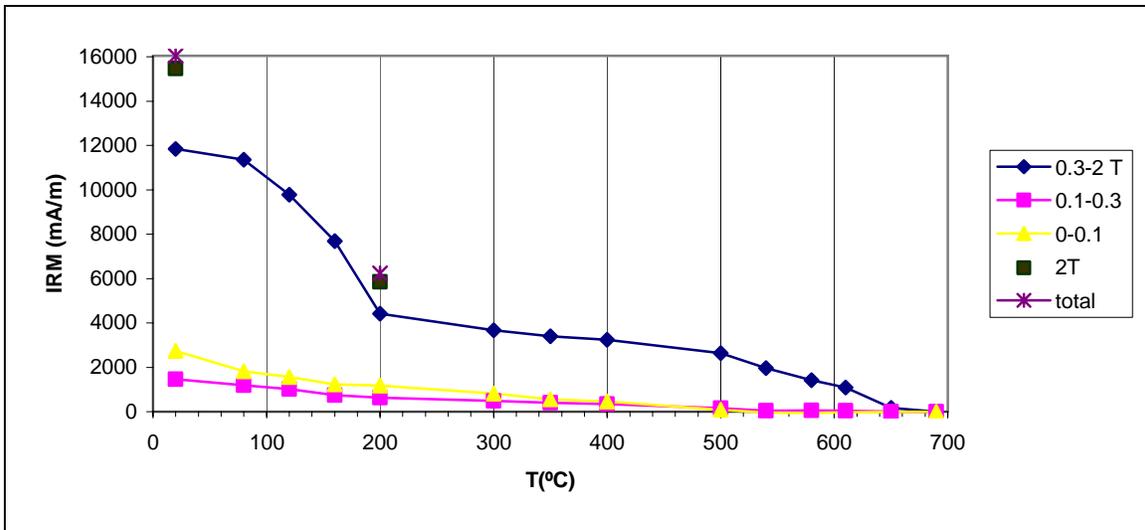


Fig. 11(a) Desimantación térmica del IRM de la 7C (grupo1), representándose la temperatura T (° C) frente a la remanencia magnética isoterma IRM (mA/m).

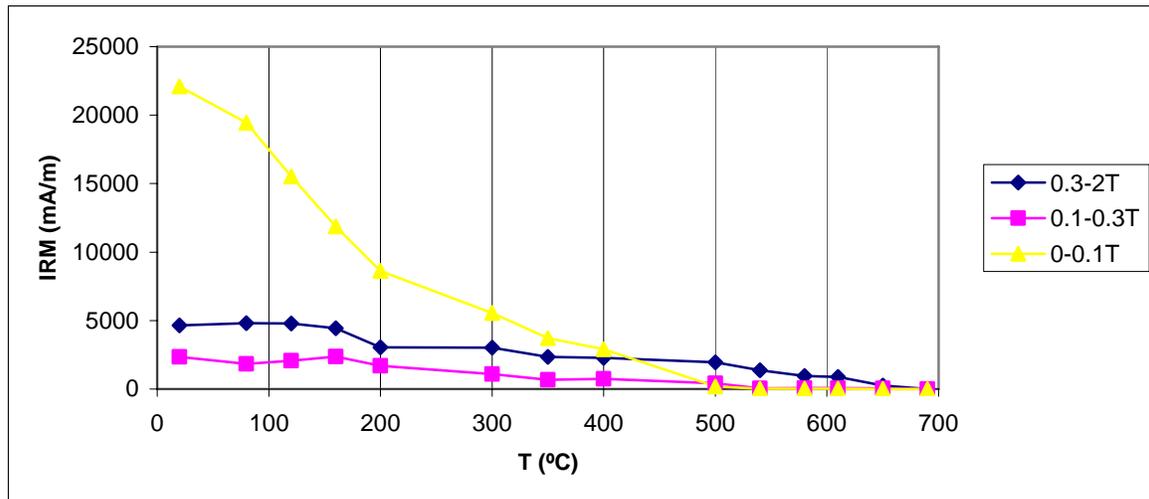


Fig. 11(b) Desimantación térmica del IRM de la 12A (grupo2).

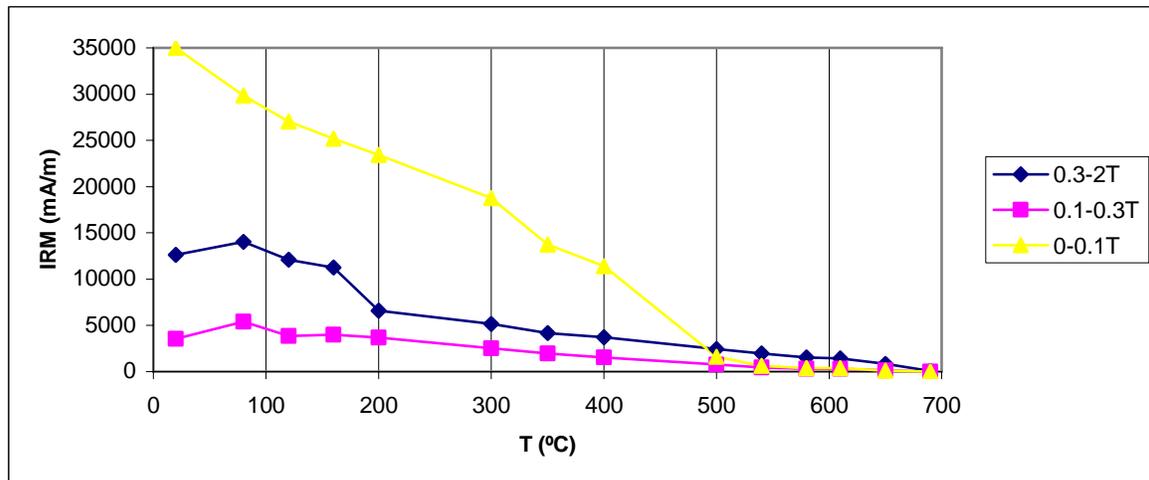


Fig. 11(c) Desimantación térmica del IRM de la 16A (grupo2 y con consolidante).

Se observa que las temperaturas de desbloqueo obtenidas mediante el IRM coinciden con las temperaturas de desbloqueo mediante la medida de NRM, encontrándose una de ellas en el intervalo 500-540° C y la otra de 200° C, lo que determina que las fases aisladas en este proceso son las mismas que las que lleva la dirección arqueomagnética.

Concretamente para el **espécimen 7C** (Fig. 11(a))

Aplicando la misma imanación en los tres ejes y las mismas temperaturas para la desimanación térmica, se encuentran unas temperaturas de desbloqueo para la fase de baja coercitividad (0 T-0.1 T) de 500° C -540° C que corresponde a *magnetita o maghemita*.

Para los valores de alta coercitividad (0.3 T <H<2 T), su temperatura de desbloqueo es de 200° C, se estudiará con más detalle.

La fase predominante en este espécimen 7C (grupo 1) es la de alta coercitividad.

Para el **espécimen 12A** (Fig. 11(b)):

La baja coercitividad presenta una temperatura de desbloqueo de 500° C, fase predominante.

La alta coercitividad presenta una temperatura de desbloqueo de 200° C y otra de entre 610° C-650° C.

Para el **espécimen 16A**, Fig. 11(c), se observa:

Que la fracción de baja coercitividad, entre 0 T- 0.1 T, tiene una temperatura de desbloqueo de entre 500° C -540° C. Esta temperatura indica que puede ser *magnetita, maghemita, hematita o titano-magnetita* con baja proporción de titanio, por ser debida a fracción de baja coercitividad, solo podrá ser *magnetita o maghemita*. La temperatura de desbloqueo de esta fase tiene correspondencia con la temperatura de desbloqueo de 540°C, obtenida mediante la medida del NRM de la desimanación térmica del espécimen 3D, Fig.6.

La otra temperatura de desbloqueo se encuentra entre 620° C-650° C indicando la presencia de *maghemita*.

En este espécimen la fase de baja coercitividad es la más importante.

Para la fase de alta coercitividad, 0.3 T<H<2T, las temperaturas de desbloqueo encontradas están entre 160° C-200° C, que tal vez pueda ser *goetita*, aunque la temperatura de desbloqueo es algo elevada (se realizará la discusión más adelante); y la otra temperatura entre 610° C-690° C.

Los valores de las temperaturas de desbloqueo entre 0.1 T-0.3T son una mezcla de los valores obtenidos en los otros dos intervalos, debido a que la fase de la imanación de 0.1T-0.3T es una mezcla de las fases que hay claramente definidas en 0 T-0.1T y en 0.3 T-2T, es decir, hay un solapamiento entre la fase de baja coercitividad con la fase de alta.

En resumen, los minerales que se tienen son magnetita, maghemita o hematita y la fase de temperatura de desbloqueo de 200° C.

El espécimen 12A tiene un comportamiento igual al del espécimen 16A, como era de esperar, ya que las dos pertenecen al grupo 2, y como se ha observado el consolidante no afecta a las propiedades mineralógicas, ni térmicas.

La temperatura de desbloqueo de 200° C permite dudar sobre el mineral contenido, es decir, para valores de 0.3 T-2 T. Como es una fase de alta coercitividad y baja temperatura de desbloqueo, podría ser debido a:

- *Hematita en la que se introduce titanio dentro de la red cristalográfica*, ya que al añadir titanio nos disminuye la temperatura de desbloqueo.
- La existencia de *estructura cristalina muy diferente*, para que así pueda disminuir la temperatura de desbloqueo.
- La presencia de *hematita* de cierto tamaño de grano muy diferente al que desbloquea a temperatura de 600° C, debido a que posea una estructura cristalográfica muy diferente o a que se haya realizado una sustitución de cationes.
- La alta coercitividad y las bajas temperaturas de desbloqueo son características de la goetita, y que pueda estar presente porque no se haya saturado a 2T, ya que la temperatura de Néel de la *goetita* es de 70° C-125° C. Pero la temperatura de desbloqueo del mineral en estudio es de 160° C-200°. Sin embargo, teniendo en cuenta que la temperatura de Néel de la goetita, también, puede ser de 200° C, cuando se cambia un hierro por un aluminio en su estructura cristalina.

Para comprobar si es goetita:

Para poder asegurar si es goetita, se considera la propiedad de que la goetita no es estable y a temperaturas superiores a 300° C se deshidrata pasando a hematita.

Como en el experimento se ha calentado hasta 700° C, si lo que contiene es goetita a esta temperatura se habría deshidratado y se habría convertido en magnetita, por eso, intentamos calentar hasta 200° C, para observar si a esa temperatura contiene magnetita, o en cambio se vuelve a reproducir el valor de temperatura de desbloqueo anterior.

Se vuelve a aplicar un campo de 2T en el eje X al espécimen 7C, se mide su IRM a temperatura ambiente, y posteriormente, se calienta a 200° C y se vuelve a medir su IRM. Así, se puede comprobar si es reproducible el punto (aspa rosa oscura) que ha sido obtenido a la temperatura de 200° C. Como se puede observar, en la Fig.11(a), representado los dos puntos nuevos en color negro, se observa como a la temperatura de 200° C vuelve a aparecer el mismo punto otra vez, es decir, coincide con los puntos representados por aspas de color rosa oscuro, que son resultantes de sumar las tres fases en cada uno de los ejes, medidos inicialmente.

A partir de los resultados obtenidos se descarta la posibilidad de que sea goetita, demostrando que el mineral encontrado es estable térmicamente, y que tiene una temperatura de desbloqueo superior a la temperatura de Néel de la goetita. Por tanto, el

mineral encontrado con temperatura de desbloqueo de 200° C debe ser cualquiera de las otras tres opciones enumeradas anteriormente, pero no goetita.

5. Discusión:

5.1. Direcciones arqueomagnéticas:

Para estudiar la dirección arqueomagnética se aplica que el valor del campo magnético en Córdoba tiene una declinación de -2.6. Sumando éste al valor de la dirección obtenida al promediar la dirección encontrada por AF, la promedio del espécimen 3, y la dirección promedio del espécimen 4, que es la calculada como dirección promedio, con valores de $D=13.4$ e $I=40.8$, es decir, sumándole -2.6 a la declinación, se obtiene que el valor de la declinación de la dirección arqueomagnética es 10.8.

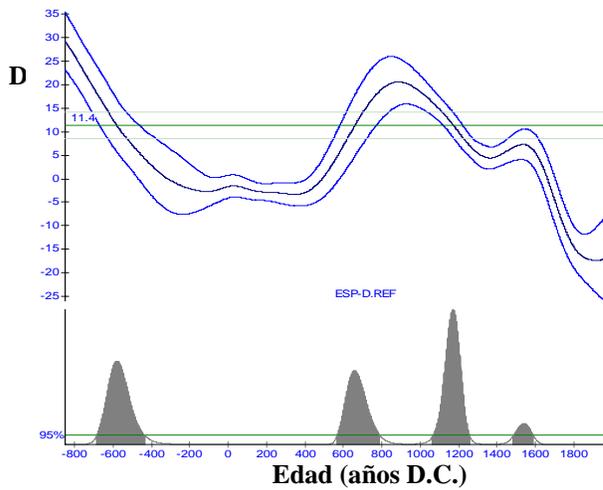
El cálculo de la dirección relocalizada VPG, es la calculada a través del polo geomagnético virtual, consiste en pasar la dirección arqueomagnética a las coordenadas de Madrid de la misma época, donde está referida la curva de referencia de Iberia con la que se datará la estructura.

Utilizando el programa di-vgp.exe e introduciendo los datos de la época del polo geomagnético $long= 139.5$ y $lat= 72.8$, se determina la declinación e inclinación que produciría en Madrid para esa misma época. Posteriormente, para determinar esa declinación e inclinación se trasladada a la latitud de Madrid utilizando el programa vgp-di.exe, obtenemos para Madrid $lat= 40.4$, $long= -3.7$ y para Córdoba **$D= 11.4$, $I=44.3$** .

Obteniéndose valores perfectamente correctos, ya que al haber elegido el modelo dipolar, es normal que la inclinación de Córdoba sea mayor, porque Madrid está más al norte (la inclinación en el ecuador es de 0°, y en los polos de 90°). (Tabla 2)

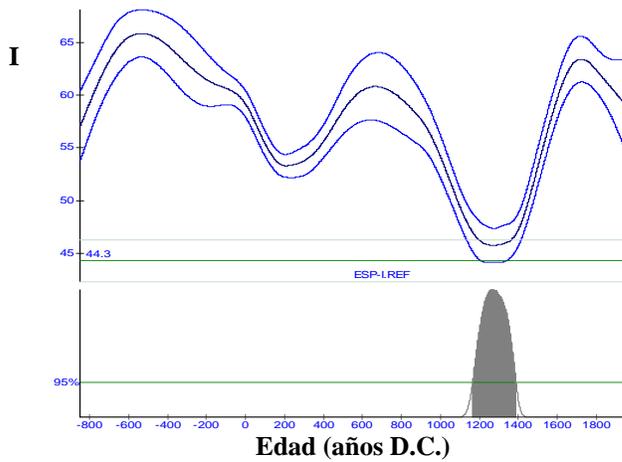
5.2. Datación arqueomagnética:

Comparando los valores obtenidos de declinación e inclinación promedios con la curva de referencia de variación paleosecular de Gómez-Paccard M. (2006) y utilizando el programa RENDATE (Lanos, 2004), en el que se selecciona un valor convencional de confianza del 95%, para estudiar que épocas son más probables para la declinación e inclinación obtenidas.



PDF (Probability Density Function)

Fig. 12(a) Curva de variación secular con su densidad de probabilidad aplicada a la declinación de la dirección de datación.



PDF (Probability Density Function)

Fig. 12(b) Curva de variación secular con su densidad de probabilidad aplicada a la inclinación de la dirección de datación.

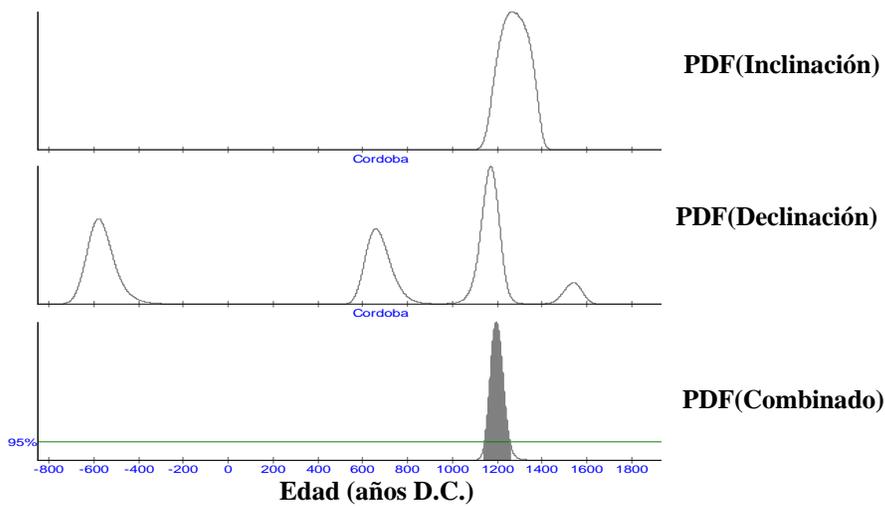


Fig. 13. Curvas de densidad de probabilidad aplicadas a la dirección de datación.

La curva central dibujada en azul es la curva de referencia con respecto a la variación en declinación, representada en el eje de ordenadas en grados E-N.

La incertidumbre con respecto a la curva de referencia está dibujada por las dos curvas en azul por encima y por debajo de la de referencia.

La recta verde oscura es la declinación procedente de la dirección de datación calculada, las dos rectas por encima y debajo de ésta son la incertidumbre.

En la parte de debajo de la Fig. 12 (a), se representa la PDF, que es la densidad de probabilidad, es decir la probabilidad de que la declinación sea igual a la de referencia. El 95% de confianza de esta probabilidad viene dada por la recta verde marcada con el valor 95%.

Para la declinación:

Se observa en la Fig. 12 (a) que hay 4 épocas que cumplen esta declinación, de entre los años -685 a -435 D.C., del 565 a 790 D.C., 1065 a 1260 D.C. y 1485 a 1590 D.C.

Aplicándolo ahora a la *inclinación*:

Obtenemos de la Fig. 12 (b) la época de entre los años 1166 a 1387 D.C.

Combinando todas las épocas, Fig. 13, que hemos obtenido como resultados de la declinación e inclinación promedios, obtenemos los valores de la datación para el horno COO62 de Córdoba.

Obteniéndose una edad arqueomagnética del horno de entre los años **1144 y 1257 D.C.**, es decir, entre el siglo XII y XIII.

5.3. Comparación con la estructura COO94:

Para el horno de Córdoba, COO94, estudiado con anterioridad por McIntoch G. and Catanzariti G. (2006), el resultado fue obtenido midiendo el AF y utilizando el mismo criterio, determinándose una edad entre los años **1161 y 1342 D. C.** La edad obtenida para el horno estudiado en este trabajo, COO62, es de entre los años **1144 y 1257 D.C.**, deduciéndose que los dos hornos son contemporáneos.

Se realizó otra prueba comparando las dos direcciones por el test de McFadden and Lowes (1981), teniendo en cuenta que la dirección del horno COO94 es **D=8.9°, I=44.3°**, y la dirección del horno COO62 es de **D=11.4°, I=44.3°**, comprobándose que las dos

direcciones de las dos estructuras son indistinguibles, ya que comparten una misma dirección promedio común, concluyéndose en base de sus respectivos valores de k , acompañados del característico 95% de error. Corroborando que los dos hornos son coetáneos y el tiempo en el que fueron abandonados, es decir, cuando tuvieron el último calentamiento, es el mismo.

Por otro lado, teniendo en cuenta la descripción del estudio arqueológico, los dos hornos estaban localizados en el mismo nivel estratigráfico, lo que implica que debían ser coetáneos.

6. Conclusiones:

Se han conseguido los objetivos propuestos:

1. Se ha aislado una buena dirección característica de la estructura, con una declinación $D=11.4^\circ$, una inclinación de $I=44.3^\circ$, un $\alpha_{95}=2.5$, $k=188.5$, utilizada para la datación del horno.
2. Comparando esta dirección con la del horno de Córdoba COO94, se puede observar que son contemporáneos.
3. Las fases magnéticas, que contribuyen a la señal magnética y al NRM, adquieren la imanación al mismo tiempo, son tres:
 - Titano-magnetita.
 - Hematita.
 - Y otra de alta coercitividad y baja temperatura de desbloqueo, puede ser: Hematita compuesta de titanio, hematita con tamaño de grano diferente, o hematita con estructura orto-rómbica debida a la arcilla calentada. No hay evidencia clara para poder diferenciar entre las tres opciones.

7. Referencias:

- Butler, R.F., 1992. *Paleomagnetism*. Blackwell Scientific Publications, Cambridge.
- Fisher, R.A., 1953. Dispersion on a sphere. Proc. Roy. Soc. London, A 271. 295-305.

Gómez-Paccard M., Lanos P., Chauvin A., McIntosh G., Osete M.L., Catanzariti G., Ruiz-Martinez V.C. and Nuñez J.I., 2006: "The first archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula. Comparison with other data from Western Europe and with global geomagnetic field models". *Earth and Planetary Science Letters*.

Kirschvink J., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 62. 699-718.

Lanos, Ph., 2004. Bayesian inference of calibration curves, application to archaeomagnetism. Chapter 3 in: Buck, C., and Millard, A., (Eds.), "Tools for Constructing Chronologies, Crossing Disciplinary Boundaries, Series: Lecture Notes in Statistics, vol. 177", Springer-Verlag, London, p. 43-82.

Lanos, Ph., Le Goff, M., Kovacheva, M., and E. Schnepf. 2005. Hierarchical modelling of archaeomagnetic data and curve estimation by moving average technique. *Geophys. J. Int.*, 160, 440-476.

McFadden, P.L., and Lowes, F.J., 1981. The discrimination of mean directions drawn from Fisher distributions. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 67, 19-33.

McIntosh G. and Catanzariti G., 2006. An Introduction to Archaeomagnetic Dating. *Geochronometria*, 25, 11-18.

Tauxe, L., 2005., *Lectures in Paleomagnetism*, <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>

Udías A., y Mezcuá J. 1986. *Fundamentos de geofísica*. Alianza Universidad Textos.