El Arqueomagnetismo como técnica de datación: Ejemplo de estudio en Fonte do Milho (Peso da Régua, Portugal), un poblado de la Segunda Edad del Hierro e inicios del Imperio

ARQUEOMAGNETISM AS DATING TECHNIQUE: FONTE DO MILHO (PESO DA RÉGUA, PORTUGAL) AS APPLICATION EXAMPLE, A SECOND IRON AGE VILLAGE AND EMPIRE BEGINNINGS

Carmona, Javier[1, 2] (j.carmona@csic.es); **Osete, M. Luisa** [1,3] (mlosete@fis.ucm.es); **A. Campuzano, Saioa**[1,3] (sacampuzano@ucm.es); **Pavón-Carrasco, F. Javier**[4]; **Larrazabal, Javier**[5] (jlarrazabal@gmail.com).

[1] Instituto de Geociencias, IGEO, CSIC, UCM. Dep Observación de la Tierra, Fac CC Físicas, Avda Complutense s/n. Madrid 28040, España *j.carmona@csic.es*
[2]Observatorio del Ebro-CSIC, Roquetes, España.
[3] Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense de Madrid, España
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma. Italia
[5] Verde&Manganês, Lda./DRCN Portugal

RESUMEN
El arqueomagnetismo como técnica de datación se basa en dos fenómenos fundamentales: por un lado que el campo magnético terrestre varía en el espacio y en el tiempo, y por otro que hay ciertos componentes en los materiales arqueológicos, como los minerales ferromagnéticos, capaces de registrarlo. El campo magnético de la Tierra se define por sus componentes: declinación, inclinación e intensidad. Estos parámetros experimentan una variación de largo periodo, de origen interno, denominada Variación Secular. Esta variación puede ser determinada a partir del estudio de la magnetización remanente registrada en materiales arqueológicos (arqueomagnetismo) bien datados, obteniéndose las denominadas "curvas de Variación Paleosecular". Si estas curvas están bien determinadas en una región en concreto se puede datar un yacimiento arqueológico por comparación con esta curva patrón. Es la denominada datación arqueomagnética. Para que un yacimiento pueda ser datado por esta técnica es necesario que haya sufrido calentamientos moderados y que el material se encuentre in situ.

En este trabajo se propone como ejemplo el estudio arqueomagnético de un hogar llevado del yacimiento de Fonte do Milho (Peso da Régua, Portugal). La edad obtenida está comprendida entre 439 a.C.- 29 d.C.. Esta edad corresponde al último calentamiento de la estructura.

Palabras clave:
Arqueomagnetismo, Datación Arqueomagnética, Variación Secular, Fonte do Milho.

ABSTRACT
The Arqueomagnetism as a dating technique is based on two fundamentals phenomena: the Earth's magnetic field changes in time and in space, and some archaeological materials that contain ferromagnetic minerals are capable to record it. The Earth's magnetic field is defined by its components: declination, inclination and intensity. Those parameters experiment long period variations of internal origin named Secular Variations. These variations can be determined from remanent magnetization studies in archaeological materials (archaeomagnetism) obtaining the "Paleosecular Variation curves". If those field variations are known for a determinate region, i.e., if the master curve is available, the archaeomagnetic dating technique can be applied. Only well heated materials which are in situ can be used for dating by this technique.

In this work we present a dating example of a kiln from Fonte do Milho archaeological site (Peso da Régua, Portugal); obtaining an absolute dating of 439 BC- 29 AD for the last heating.

Key words:
Arqueomagnetism, Arqueomagnetic dating, Secular variation, Fonte do Milho.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan los resultados del estudio arqueomagnético llevado a cabo en las excavaciones arqueológicas de Fonte do Milho (Portugal) durante septiembre de 2013. El yacimiento de Fonte do Milho ha sido objeto de diversas campañas arqueológicas pero, hasta el presente, no de investigaciones arqueomagnéticas.

El yacimiento de Fonte do Milho se localiza en la población de Canelas (Peso da Régua, Portugal) (fig. 1). Según los estudios arqueológicos presentó sucesivas ocupaciones desde la Edad del Hierro hasta época romana. El material muestreado es un hogar, en buen

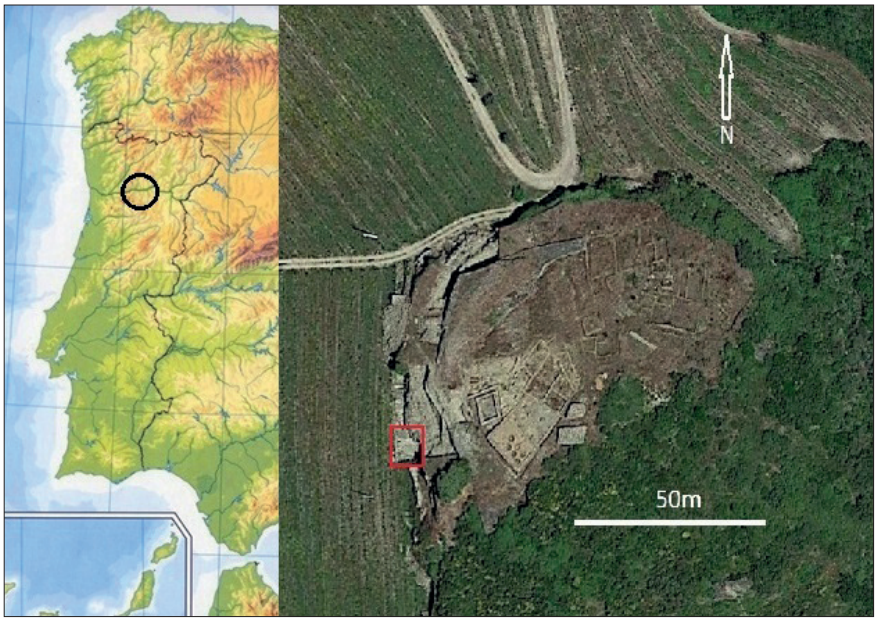

Figura 1: Localización del yacimiento de Fonte do Milho. Rectángulo rojo: localización del hogar estudiado (Imagen de satélite: Google Earth)

estado de conservación, localizado bajo la muralla exterior del recinto superior o *acrópolis*. Sus dimensiones son reducidas, sin llegar a superar el metro de ancho. La estructura presenta cierto basculamiento hacia la muralla que se asienta sobre el hogar (fig. 2), por lo que se han determinado los valores del basculamiento secundario posterior a la última utilización del hogar para hacer las oportunas correcciones.

FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA

La remanencia magnética es la propiedad física por la cual un material es capaz de retener en el tiempo cierta información magnética adquirida en un momento determinado. En la corteza terrestre existen una serie de materiales capaces de retener esta información, estos materiales son los minerales ferromagnéticos. Los minerales ferromagnéticos de más interés en arqueomagnetismo son óxidos de hierro (magnetita, hematites y maghemita). Dichos minerales aunque estén en baja concentración son relativamente frecuentes en rocas y sedimentos, por lo que estarán también presentes en los materiales arqueológicos.

No todos los materiales arqueológicos son aptos para ser datados. En primer lugar deben muestrearse *in situ* para poder obtener valores direccionales del campo geomagnético. En segundo lugar deben corresponder con estructuras que

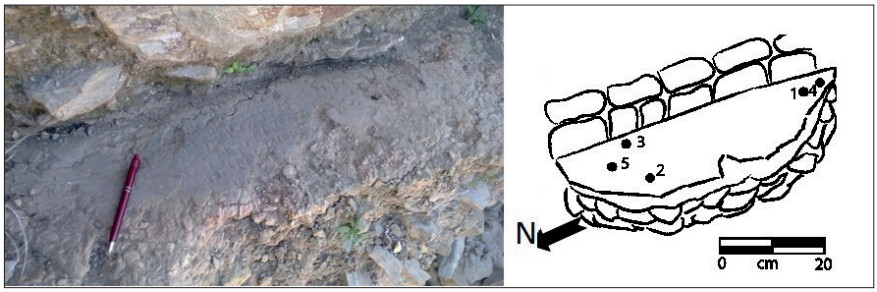

Figura 2: Hogar de Fonte do Milho bajo la muralla y situación de las muestras investigadas.

hayan sufrido importantes calentamientos (ladrillos, tejas, cerámicas, estructuras de combustión, hogares, etc.), debido a que la remanencia magnética se origina cuando los materiales son calentados y enfriados en presencia del campo magnético terrestre. Durante el proceso de calentamiento la información magnética previa contenida en los minerales ferromagnéticos, correspondiente al momento en que se formaron dentro de la roca, desaparece una vez que se supera una temperatura concreta y característica de cada mineral y estado magnético (Temperatura de desbloqueo). Durante el subsiguiente enfriamiento, esos mismos minerales son capaces de reorientarse en la dirección del campo existente en ese momento concreto y conservar la magnetización adquirida. Cuando los calentamientos se realizan a altas temperaturas (500-600ºC) favorecen la presencia de fases minerales estables que posibilitan buenos estudios de arqueointensidad del campo.

Los utensilios cerámicos de almacenamiento, tejas o ladrillos conservan la magnetización del momento de producción, ya que en principio no deberían ser calentados a altas temperaturas posteriormente, mientras que las estructuras de combustión así como las cerámicas nuevamente calentadas, conservan la remanencia adquirida durante su último enfriamiento, correspondiente por tanto al momento del abandono en la mayor parte de los casos. Igualmente si existe un segundo calentamiento, y éste llega a temperaturas considerables, el mismo fenómeno anteriormente descrito hace que se puedan identificar distintos momentos de adquisición del campo por el material y por tanto poder fechar la reutilización de los materiales.

La comparación del vector magnetización, obtenido tras el estudio arqueomagnético, con las curvas de referencia regionales que describen la evolución espacio-temporal del campo magnético terrestre, permiten datar el momento en el que la estructura arqueológica adquirió la imanación. Este es el fundamento de la técnica de datación arqueomagnética.

TRATAMIENTO DE LABORATORIO

Se extrajeron un total de 6 muestras de mano (fig. 2). Fueron orientadas en el campo con brújula magnética. De cada muestra se recogieron, además, los datos de buzamiento y dirección de la capa o dirección de máxima pendiente que permiten establecer la orientación de las estructuras en coordenadas geográficas, es decir, restablecer posteriormente su posición original durante el momento de adquisición de la magnetización remanente. Esta información aparece reflejada en la tabla 1.

En el laboratorio, las muestras fueron consolidadas para una mejor manipulación posterior con silicato sódico en dos etapas, una primera al 75% y otra al 90%. Dado el pequeño tamaño de algunas de ellas y para facilitar el proceso de cortado, se introdujeron en moldes de escayola. Las muestras se cortaron en cubos de 2cm de lado, siempre conservando la referencia del norte magnético tomada en el campo.

De todas las muestras obtenidas se eligieron las que mejor estado de conservación presentaron, escogiéndose un total de 32 especímenes para el proceso de medición y desimanación.

El análisis de las muestras en el laboratorio consistió, en primer lugar, en medir la NRM (magnetización remanente natural). La NRM es la suma de todas las magnetizaciones adquiridas a lo largo de la historia del material. Para la medida de la NRM se empleó un magnetómetro de tipo rotativo (JR5 A) y otro

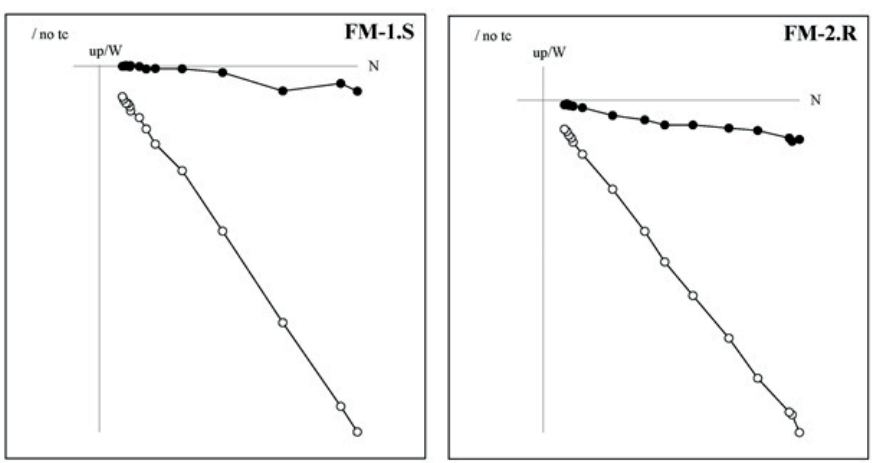

Figura 3: Diagramas de Zijderveld de dos muestras representativas desimanadas por campos alternos. En círculos llenos se representa la declinación, mientras que los círculos vacíos corresponden a la inclinación. En ambas se aprecia una única componente magnética bien determinada. Los pasos de desimanación utilizados fueron 1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 30, 35, 40, 50, 60, 80 y 100 mT.

FORMULARIO DE MUESTREO ARQUEOMAGNÉTICO
Laboratorio de Paleomagnetismo - U.C.M.-CSIC

Nombre de la Excavación: Fonte do Milho		**Edad:** Edad del hierro ¿?	**Tipo Estructura:** Hogar
ID. Sitio: FM	**Localidad:** Entre Peso da Règua y Canelas (Portugal)		**Fecha Muestreo:** 19/09/2013
Localización del Sitio	**Latitud (ºN) :** 41.10	**Longitud (ºE) :** -7.42	**Declinación (ºE):** -2.75
Responsable/s Muestreo: María Luisa Osete López, Javier Carmona Adell		**Arqueólogo/s Responsable/s:** Javier Larrazabal Galarza	
Nº Muestras: 6 + fragmentos sin orientar +cerámica de debajo del torreón	**Tipo de Muestras:** Taladradas ☐ De Mano X	**Tipo de Brújula:** Magnética X Solar ☐	

Comentarios del Muestreo:

Hogar localizado bajo la muralla. La muralla es posterior. Se han recogido otras muestras de hogar en los derrubios bajo el torreón denominado Hogar 2.

No corregidos por la declinación magnética del lugar.

MUESTRA	Dirección capa	Dirección máx. pendiente	Buzamiento	COMENTARIOS
FM-1		276	3	Hay varios especímenes
FM-2		300	10	Hay varios especímenes, algunos de ellos de la parte más externa de la muestra
FM-3		300	11	
FM-4	208		29 E	Claramente basculada hacia la muralla
FM-5	183		16 E	
FM-6	44		18 S	
Hogar 2				Recogidas los derrubios bajo el torreón, sin orientar

Tabla 1: Información sobre el muestreo en Fonte do Milho.

	sin corrección		con corrección	
	Inclinación	Declinación	Inclinación	Declinación
FM-1.D	79,7421593	-19,3673938	69,834395	-23,3985602
FM-1.E	57,2296485	-11,6682988	69,8357737	-4,21505103
FM-1.R	52,3266538	8,21824499	68,7554515	3,19876855
FM-2.B	51,3333751	1,02516394	59,2342193	-21,9340412
FM-2.P	47,645131	10,8204282	58,281467	-1,44070888
FM-2.S	53,0849651	-6,4940024	62,7852013	-8,43621876
FM-2.U	55,5944055	4,28404242	60,3561809	9,24553455
FM-2.V	57,8354273	5,49139826	63,1290827	6,37886673
FM-2.X	57,0254015	-3,17789166	59,4962024	-2,87518441
FM-2.Z	43,7818553	5,40003723	58,2695169	-0,35287852
FM-3.B	57,2425245	10,0428652	63,009223	2,06693419
FM-3.L	54,9962788	15,3244998	61,1916615	8,39641935
FM-3.M	51,5232285	22,2502481	60,3679076	12,4377316
FM-3.P	58,9524311	15,4796993	60,6060249	9,69836957
FM-3.Q	45,6566003	15,886153	57,3752997	9,66619411
FM-3.R	54,8822242	5,67942109	57,8593241	3,12209014
FM-6.B	63,8106584	8,1010008	56,3611798	14,2763549
	Dec. 6.38 Incl. 55.75 K=54.2345 α95=4.022		Dec. 1.58 Incl. 61.92 K=193.0047 α95=2.7	

Tabla 2: Parámetros magnéticos (inclinación y declinación) de las muestras estudiadas: sin corrección y con corrección por anisotropía. En negrita se muestra los resultados tras aplicar los parámetros estadísticos.

fluxgate (Molspin) en el laboratorio de Paleomagnetismo de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid.

Las muestras se desimanaron paulatinamente para identificar la componente característica, adquirida durante el último enfriamiento del hogar. Los dos procedimientos de desimanación o lavado magnético empleados de forma rutinaria en los estudios de paleomagnetismo son el lavado térmico y el lavado por campos alternos decrecientes.

Desimanación por campos alternos

Consiste en someter las muestras a la acción de un campo magnético alterno y decreciente. Con ello se desimanan aquellos granos minerales que presentan campos coercitivos menores. Se realizan sucesivos pasos de desimanación a campos cada vez más intensos desimanando así progresivamente componentes más estables. Se seleccionaron la mitad de las muestras para la desimanación por esta técnica, siendo los pasos de desimanación 1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 30, 35, 40, 50, 60, 80 y 100 mT. Para la desimanación por campos alternos decrecientes se usó un equipo desimanador GSD-5 Schonstedt. Después de cada paso de desimanación se volvió a medir la magnetización remanente para determinar las componentes magnéticas presentes en las muestras (fig. 3).

Desimanación térmica

Las muestras restantes se desimanaron térmicamente. Esta técnica consiste en someter las muestras a varios pasos de calentamiento de manera que los distintos granos magnéticos van perdiendo su remanencia al superar su temperatura de bloqueo, hasta llegar a la temperatura de Curie, en la cual los minerales ferromagnéticos dejan de presentar este comportamiento y se comportan como paramagnéticos, es decir, ya no son capaces de retener la orientación magnética del campo en ese momento. La rampa de temperatura utilizada fue de 100, 200, 250, 300, 350, 400, 425, 450, 475 y 500 ºC, y, ocasionalmente hasta 525 ºC.

Para hacer más completo el estudio se realizó un análisis adicional de paleointensidad. Para la realización de estos estudios, en cada paso de calentamiento las muestras se introdujeron en un campo magnético de intensidad 50 mT y dirección controlada, es decir, para cada temperatura se aplicó el campo en un sentido (eje +Z) y posteriormente se realizó el mismo calentamiento, actuando la misma intensidad de campo en sentido contrario (eje –Z), siguiendo la técnica de Thellier y Thellier (1959). Esta técnica permite comparar la desimanación parcial de la termorremanencia magnética natural con la adquisición de termorremanencia parcial en un campo controlado. De esta forma podemos obtener valores de la paleointensidad del campo que actuó durante el último calentamiento.

Con objeto de evaluar la anisotropía magnética, en el paso de 475ºC se realizó un estudio más detallado. La forma de construcción de un hogar es muy anisótropa. Es

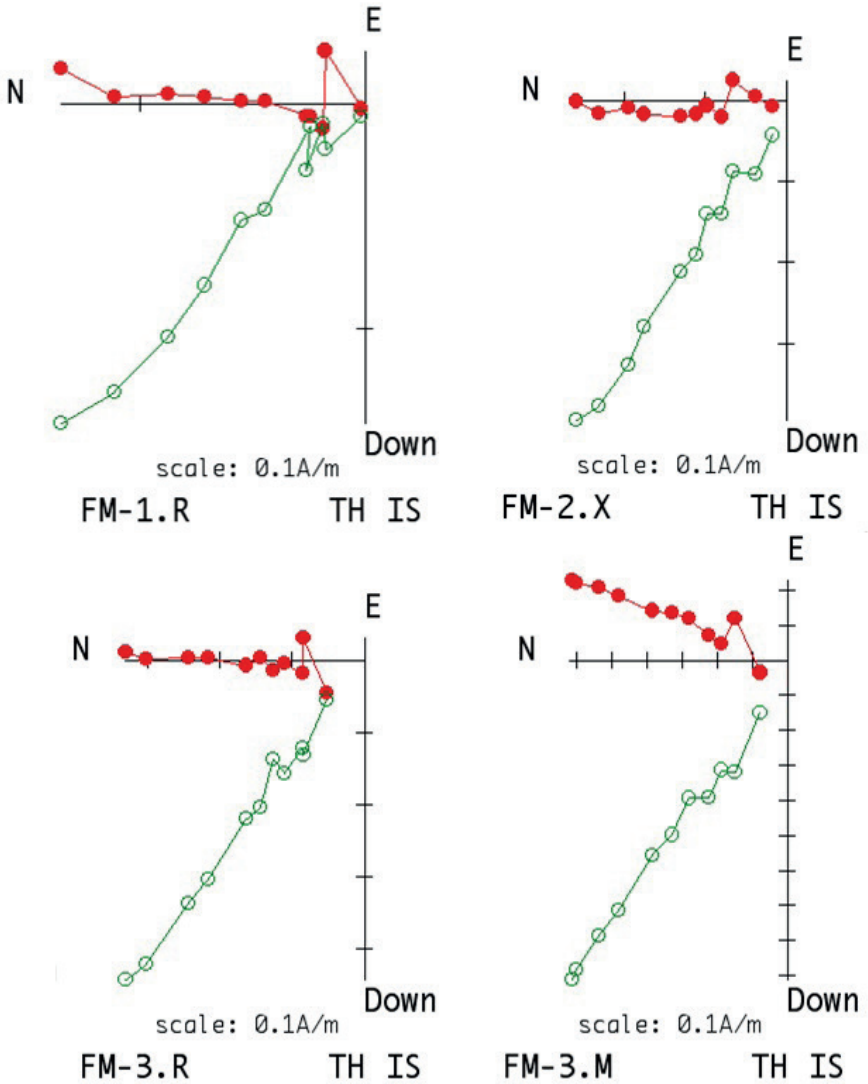

Figura 4: Diagramas de Zijderveld de cuatro muestras representativas desimanadas térmicamente. En todos ellos se aprecia una única componente magnética bien determinada. Los pasos de temperatura utilizados fueron 100, 200, 250, 300, 350, 400, 425, 450, 475 y 500 ºC y ocasionalmente hasta 525 ºC.

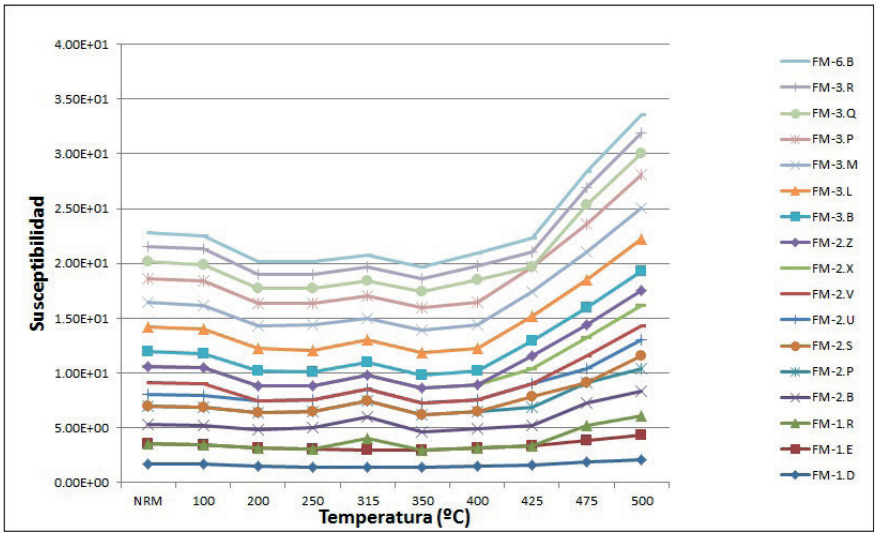

Figura 5: Variaciones de la susceptibilidad magnética con la temperatura de calentamiento.

decir se favorecen una serie de direcciones preferentes de los minerales, de manera que el resultado del estudio magnético puede estar condicionado por este fenómeno y por tanto éste debe ser evaluado para hacer una correcta corrección. Se realizaron 6 mediciones bajo un campo controlado de 50mT en las direcciones X+, X-, Y+, Y-, Z+ y Z- para obtener el tensor de anisotropía de cada muestra.

RESULTADOS

Las muestras presentaron un buen comportamiento magnético (figs. 3 y 4), caracterizado por la presencia de una única componente estable (además de la componente viscosa habitual de baja coercitividad y baja temperatura de desbloqueo que se elimina durante los primeros pasos de desimanación).

De todas las muestras analizadas, las correspondientes a la muestra de mano FM-4 fueron descartadas porque aunque presentaban un correcto comportamiento magnético, las direcciones calculadas resultaron ser anómalas debido, muy probablemente, a un error en el muestreo o submuestreo que no pudo ser corregido.

En el resto de las muestras se halló una única componente magnética cuyas direcciones fueron calculadas por medio de regresión lineal.

En cada paso de calentamiento se realizó una medición de la susceptibilidad magnética (fig. 5), para poder detectar variaciones en la composición de los minerales ferromagnéticos, ya que el propio proceso de calentamiento-enfriamiento en un horno puede producir alteraciones de los mismos (oxidación y

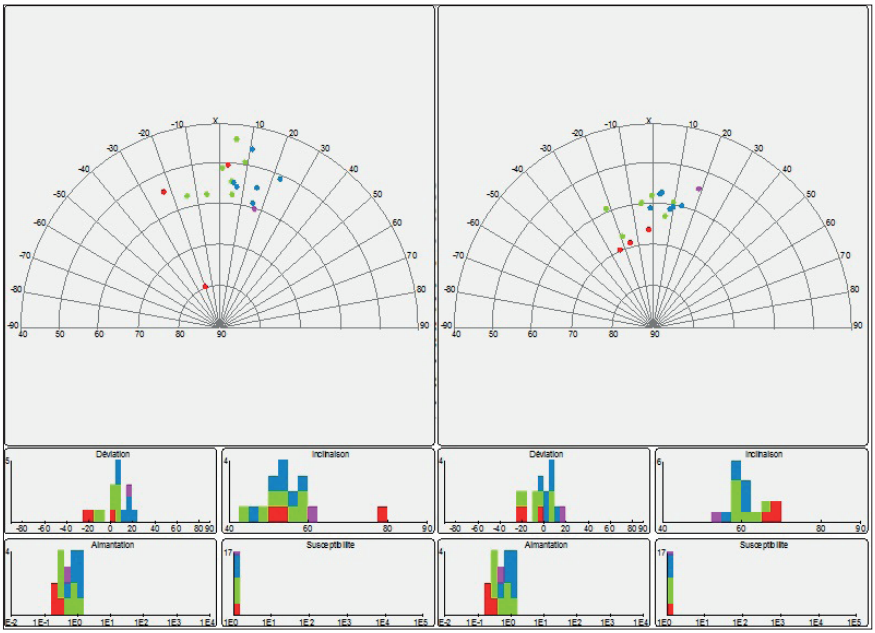

Figura 6: Proyección de la declinación e inclinación de cada una de las muestras del estudio. Cuando no se considera la corrección por anisotropía (izquierda) las muestras presentan una gran dispersión, que se reduce notablemente al aplicar dicha corrección (derecha). Los valores de inclinación del vector aumentan considerablemente, la declinación por el contrario varía de forma menos importante.

neoformación de nuevas fases estables). En el caso de Fonte do Milho no se detectó ninguna alteración significativa durante el proceso de desimanación térmica.

La medida de las direcciones paleomagnéticas está sometida a diferentes causas de dispersión (errores en la orientación, ruidos en la medida de la imanación, incompleto aislamiento de las componentes, etc.), de las cuales no se tiene un control directo, por lo que, para estimar su efecto, se toman habitualmente un número suficiente de muestras y se tratan estadísticamente. La operación principal en el análisis de las direcciones paleomagnéticas es el cálculo de la dirección media de una población procedente de un grupo de muestras. A estos vectores imanación se les asigna un peso unitario y se los representa como puntos sobre una esfera de radio unidad. Las direcciones así obtenidas se analizan según la estadística de Fisher (Fisher, 1953), definiendo un límite de confianza, a, análogo a la desviación estándar de un valor medio en la estadística gaussiana. El nivel de probabilidad utilizado habitualmente en paleomagnetismo es del 95%, por lo que el parámetro estadístico es el a95.

El límite de confianza, a95, es una medida de la precisión con la que se ha estimado la dirección verdadera. Por tanto, las direccio-

nes medias siempre se presentan acompañadas de un a95, que representa la región donde existe el 95% de probabilidad de encontrar la dirección verdadera. En la tabla 2 se presentan los resultados de la determinación de la componente magnética principal para cada una de las muestras seleccionadas en este estudio.

Las direcciones obtenidas fueron corregidas por el efecto de anisotropía que ha sido evaluado a partir del elipsoide de anisotropía magnética, determinado para cada muestra. Este efecto ha sido especialmente relevante en estos materiales. Tal como se puede observar en la figura 6, los parámetros del vector magnético, especialmente la inclinación, aumenta al aplicar la corrección por anisotropía. Igualmente, es notoria la reducción de la dispersión de los datos al aplicar dicha corrección.

El estudio de paleointesidad no resultó satisfactorio puesto que el diagrama de Arai no resultaba lineal. A partir de los 400ºC, se observaron paleointensidades erráticas y un aumento en la susceptibilidad (fig. 5) indicando que se producen alteraciones a dichas temperaturas, lo que podría sugerir que el hogar no alcanzó temperaturas superiores a 400ºC.

Finalmente se obtuvo la dirección media (con corrección de anisotropía) y los parámetros estadísticos de los materiales investigados en Fonte do Milho, correspondiendo a una declinación 1.6, una inclinación 61.9, un factor K=193.0 y a95=2.7º

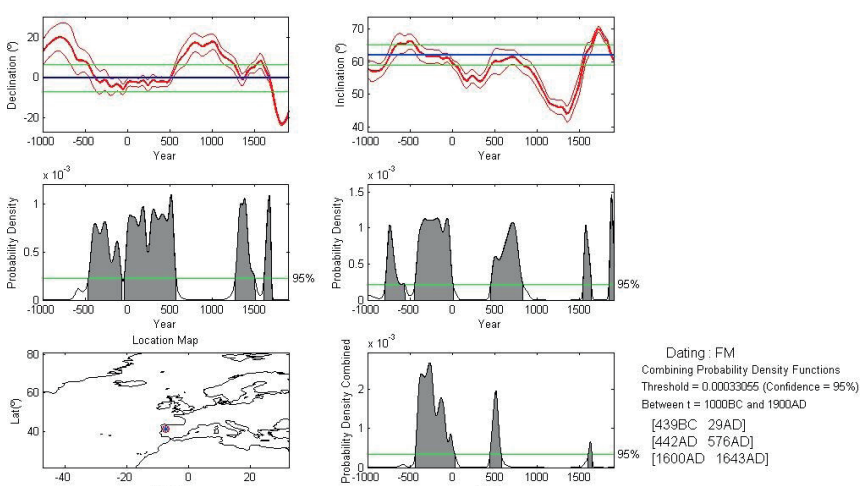

Figura 7: Resultados obtenidos para Fonte do Milho utilizando el programa desarrollado por (Pavón-Carrasco et al., 2011) con el modelo arqueomagnético para los últimos 3000 años en Europa SCHA.DIF.3K (Pavón-Carrasco et al., 2009).

La comparación de la dirección del hogar con las direcciones que ha tenido el campo magnético terrestre en la zona de estudio durante los últimos 3000 años utilizando el programa archaeo_dating (Pavón-Carrasco et al., 2011) y el modelo de campo europeo (Pavón-Carrasco et al., 2009), ha permitido establecer las edades arqueomagnéticamente más probables para el yacimiento. En la figura 7 se muestran los resultados de la datación arqueomagnética obtenida. Coincidencias direccionales al 95% de probabilidad se producen durante 439 a.C.- 29 d.C., 442-576 d.C. y 1600-1643 d.C. De estas coincidencias direccionales la única que tiene sentido arqueológico es la correspondiente al periodo: 439 a.C.-29 d.C., que es la que se ha considerado como edad de la estructura.

CONCLUSIONES

La componente magnética característica aparece muy bien definida en todas las muestras, lo que indica, que el horno alcanzó temperaturas moderadas. Sin embargo a partir de 400ºC se producen alteraciones químicas que podrían indicar, que no se alcanzaron temperaturas superiores.

La curva de referencia que se ha utilizado en este trabajo para la datación arqueomagnética es la curva sintética generada por el modelo SCHA.DIF.3k (Pavón-Carrasco et al., 2009), modelo que reproduce las variaciones del campo geomagnético en Europa durante los últimos 3000 años. Junto con el programa de datación archaeo_dating (Pavón-Carrasco et al., 2011).

La comparación de la dirección media registrada en el hogar y la curva de referencia, establece tres zonas de máxima probabilidad de coincidencia para la declinación y la inclinación. Los valores magnéticos obtenidos en este estudio son análogos a los de la curva de referencia entre los años 439 a.C.-29 d.C., 442-576 d.C. y 1600-1643 d.C.. La localización del hogar bajo la muralla exterior del recinto superior del sitio, además de la ausencia de indicios de carácter arqueológico, que sugieran una reutilización del hogar o un posterior calentamiento, indica que el hogar de Fonte do Milho se utilizó por última vez entre los años 205 a.C. ± 234 (al 95% de probabilidad).

REFERENCIAS

R.A. FISHER. Dispersion on a sphere. Proc. R. Soc. London 217, 1953, 295-305.

F. J. PAVÓN-CARRASCO, M. L. OSET, J. M. TORTA, and L. R. GAYA-PIQUÉ. A regional archeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3K: Applications to archeomagnetic dating, Geochem. Geophys. Geosyst., 10, 2009, Q03013. doi:10.1029/2008GC002244.

F.J. PAVÓN-CARRASCO, J. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M.L. OSETE and M. Torta, A Matlab tool for archaeomagnetic dating. Journal of Archaological Science, 38, 2011, 408-419, 2011.

E. THELLIER and O. THELLIER. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, Ann. Géophys., 15, 1959, 285–376.