



La datación arqueomagnética. Fundamentos, éxitos y limitaciones

Archaeomagnetic dating: Fundamentals, achievements and limitations

Carrancho, Á. ⁽¹⁾; Gómez-Paccard, M. ⁽²⁾; Pavón-Carrasco, F.J. ^(2,3)

(1) Área de Prehistoria, Departamento de Historia, Geografía y Comunicación, Universidad de Burgos, Edificio I+D+I, Plaza Misael Bañuelos s/n 09001, Burgos, Spain. E-mail: acarrancho@ubu.es

(2) Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), c/del Doctor Severo Ochoa, 7, Edificio Entrepabellones 7 y 8, 28040 Madrid, España.

(3) Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de CC. Físicas, Plaza de Ciencias, 1, 28040 Madrid, España.

Resumen

El arqueomagnetismo es una técnica de datación que permite datar el último calentamiento de ciertos materiales arqueológicos y geológicos quemados. El estudio de la termorremanencia registrada en materiales como hornos, hogares o rocas volcánicas, permite reconstruir las variaciones en la dirección y/o intensidad del campo magnético terrestre a lo largo del tiempo mediante el desarrollo de curvas regionales y modelos paleomagnéticos. Estas curvas y modelos son potentes herramientas de datación y la mayoría, incluidas las existentes para la península ibérica, abarcan los últimos 3-4 milenios. Actualmente es posible datar el último uso (calentamiento) y potencial abandono de una estructura de combustión arqueológica de edad menor a 4 mil años con una incertidumbre temporal que puede variar, según factores, entre los ± 50 años y unos pocos siglos. Se presenta una síntesis de los fundamentos de la técnica, los materiales de interés y cómo abordar su muestreo. Se discute el rango cronológico de aplicación del método y qué factores condicionan su precisión temporal. Finalmente, se presenta un caso de datación de una estructura de combustión prehistórica peninsular donde se describen los pasos seguidos para obtener su datación arqueomagnética. La mejora y ampliación temporal de la técnica depende notablemente de la colaboración interdisciplinaria entre geofísicos y arqueólogos.

Palabras clave: Campo magnético terrestre, variación secular, termorremanencia, estructura de combustión, óxidos de hierro.

Abstract

Archaeomagnetism is a dating technique that allows dating the last heating of certain burnt archaeological and geological materials. The study of the thermoremanence recorded in some materials such as furnaces,



hearthths and volcanic rocks, allows us to reconstruct the variations in direction and/or intensity of the Earth's magnetic field over time through the development of regional curves and geomagnetic field models. These curves and models are powerful dating tools and most of them, including those developed for the Iberian Peninsula, span the last 3-4 millennia. Currently, it is possible to date the last use (heating) and potential abandonment of an archaeological combustion structure from the last 4,000 years with a temporal uncertainty that can vary, depending on factors, between ± 50 years and a few centuries. Here we report a synthesis of the technique's fundamentals, the materials of interest and how to approach their sampling. The chronological range of application of the method and the factors determining its temporal precision are also discussed. Finally, a dating case of a peninsular prehistoric combustion structure is shown describing the steps followed to obtain an archaeomagnetic dating. The improvement and chronological extension of the technique notably depends on the interdisciplinary collaboration between geophysicists and archaeologists.

Keywords: Earth's magnetic field, secular variation, thermoremanence, combustion structure, iron oxides.

1. Introducción

El arqueomagnetismo es una disciplina geofísica que estudia el registro de las variaciones en dirección e intensidad que experimenta el campo magnético terrestre (CMT) en materiales arqueológicos o geológicos calentados a alta temperatura. El CMT en cualquier punto de la superficie de la Tierra es un vector con dirección e intensidad y viene descrito mediante tres parámetros: la declinación (D) y la inclinación (I) que definen la dirección, y la intensidad o módulo del vector (F). La *declinación magnética* (D) es el azimut (ángulo medido desde el norte) de la proyección a la horizontal del campo (la aguja de una brújula convencional), tomando valores positivos hacia el Este. Es decir, se mide en sentido horario desde 0° a 360° . La *inclinación magnética* (I) es el ángulo que forma el CMT con el plano horizontal. El extremo que señala al norte se inclina hacia abajo en el hemisferio norte y hacia arriba en el hemisferio sur. La *intensidad* (F) del CMT se mide en Teslas en el Sistema Internacional y también varía con valores que van desde los $70 \mu\text{T}$ en los polos magnéticos a unos $20 - 30 \mu\text{T}$ en el ecuador magnético (Villalaín, 2016). Tanto la dirección como la intensidad del CMT varían espacial y temporalmente a diferentes escalas. Atendiendo a los cambios de largo período del CMT, existen tres fenómenos fundamentales: las inversiones de polaridad, las excursiones geomagnéticas y la variación secular. El que

aquí nos interesa particularmente es la "*variación paleosecular*" (VPS), que consiste en pequeños cambios en dirección e intensidad a lo largo de los siglos pasados. Para latitudes medias como la península ibérica, el rango de dispersión direccional de la VPS oscila entre $\pm 20^\circ$ en declinación y entre 40° y 70° en inclinación (Gómez-Paccard *et al.* 2006). Estos cambios suceden constantemente y, a diferencia de las inversiones de polaridad que son un evento global, la VPS es un fenómeno regional. Es decir, son cambios reproducibles en áreas no mayores a unos 900-1000 km de radio (Lanos 2004).

Desde que existen registros históricos tomados de diferentes lugares del planeta para los últimos siglos, se ha podido constatar que el CMT no es estático y varía tanto espacial como temporalmente (ej.: Jackson *et al.* 2000). Sin embargo, para reconstruir las variaciones del CMT a cronologías más antiguas (más allá de las observaciones directas que abarcan los últimos 3-4 siglos), es necesario analizar registros arqueológicos o geológicos que hayan sufrido procesos de calentamiento a alta temperatura (preferiblemente $> 500 - 600^\circ\text{C}$). Como se explica más adelante, el calentamiento a alta temperatura permite el registro de un tipo de magnetización muy estable y duradera conocida como *magnetización remanente térmica* o *termorremanencia* (TRM, de sus siglas en inglés). Esta constituye un registro paralelo y proporcional al CMT

existente en el momento del enfriamiento del material.

El arqueomagnetismo es una disciplina con una larga tradición en ciertas zonas de Europa. El esfuerzo pionero de E. Thellier desde los años 40 del S. XX en Francia, o posteriormente, el trabajo de M. Kovacheva en Bulgaria (por mencionar algunos), sentó las bases del desarrollo de la técnica arqueomagnética a escala europea a finales del S.XX. Los estudios que promovieron el desarrollo de la técnica arqueomagnética en la península ibérica de forma sistemática comenzaron en el año 2002 en el marco del proyecto europeo AARCH (*Archaeomagnetic Applications for the Rescue of Cultural Heritage*), coordinado a nivel nacional por la Dra. María Luisa Osete (UCM, Madrid). Gracias al estudio de múltiples estructuras de combustión arqueológicas bien quemadas, *in situ* e independientemente bien datadas por otros métodos (ej.: ^{14}C o TL), se fue desarrollando una *curva de variación paleosecular* (CVPS) de la península ibérica que actualmente abarca los últimos 3 milenios (Gómez Paccard *et al.* 2006; Molinacardín *et al.* 2018). La progresiva compilación de nuevos datos arqueomagnéticos permite mejorar y extender temporalmente las CVPS que ya se utilizan para datar. El trabajo futuro pasa por obtener nuevos y más antiguos datos arqueomagnéticos, tanto de dirección como de intensidad, que permitan implementar estos registros geomagnéticos y, en lo posible, extenderlos hacia atrás en el tiempo.

En este capítulo explicaremos los fundamentos básicos de la técnica, qué materiales son de interés para abordar estos estudios y qué técnicas de muestreo se usan generalmente. Se discutirá el rango cronológico de aplicación del método, así como los factores que determinan su incertidumbre temporal. Finalmente, se presenta un caso práctico de datación sobre una estructura de combustión arqueológica donde se describe de forma didáctica los pasos seguidos para obtener la datación arqueomagnética.

2. Metodología

2.1. Principios del método

Para estudiar el CMT más allá del periodo cubierto por las observaciones directas (últimos 3-4 siglos), es necesario recurrir a la capacidad de ciertas rocas y materiales arqueológicos de adquirir una magnetización remanente en respuesta a la acción de un campo magnético externo. En efecto, muchas rocas y materiales arqueológicos contienen minerales ferromagnéticos de tamaño micrométrico (principalmente óxidos de hierro como la magnetita), que son capaces de actuar como “brújulas fósiles” cuando son sometidos a procesos de calentamiento intenso en el pasado. Cuando dichos materiales se calientan por encima de una cierta temperatura conocida como *temperatura de Curie* (T_c), estos minerales ferromagnéticos se comportan como paramagnéticos (no preservan magnetismo remanente). Sin embargo, cuando el material se enfría por debajo de una cierta temperatura llamada *temperatura de bloqueo* o T_b ($T_b < T_c$), y en presencia de un campo magnético externo muy pequeño como el de la Tierra, la magnetización permanece “bloqueada” y se conserva de forma estable en esa posición aunque cambie o desaparezca el campo magnético exterior. La señal magnética adquirida, llamada magnetización termorremanente (en adelante, TRM), es además proporcional al campo magnético exterior presente en el momento de enfriamiento de los minerales magnéticos. Es importante señalar que la TRM así adquirida puede ser destruida si se vuelve a calentar el material por encima de su temperatura de bloqueo (T_b). El efecto del aumento de la temperatura por encima de T_b es, por tanto, el de destruir el orden previo de los momentos magnéticos atómicos. Pero cuando se produce un nuevo enfriamiento, el material vuelve a magnetizarse según las propiedades del campo magnético externo de ese momento. Por ello, la TRM de los materiales arqueológicos calentados refleja las características del CMT durante el último proceso de calentamiento y subsiguiente enfriamiento (ej.: última utilización de un horno); es decir,

durante su potencial abandono arqueológico. Los minerales ferromagnéticos más comunes en materiales arqueológicos, son los óxidos de hierro como la magnetita, la maghemita, la hematites o hidróxidos de hierro como la goetita, a veces presentes con sustituciones parciales del hierro por parte de otros cationes como el titanio, el aluminio, o el silicio. El estudio de la TRM grabada en materiales arqueológicos (o en rocas volcánicas datadas) constituye, por tanto, el método más eficaz para analizar la variación secular del CMT en el pasado (Tauxe 2010). Alternativamente, tal y como se explica en la sección 3, disponer de una CVPS patrón o de referencia permite

datar el último calentamiento o uso de cualquier estructura de combustión arqueológica comprendida en el intervalo temporal que abarque esa curva.

2.2. Materiales de interés

El gran potencial del arqueomagnetismo en el ámbito de la arqueología radica en el hecho de que los óxidos de hierro anteriormente mencionados se encuentran presentes en muchos materiales arcillosos que han sido sometidos a procesos de calentamiento intenso en el pasado como, por ejemplo, hornos, hogares,



Figura 1. Ejemplos de materiales arqueológicos estudiados mediante la técnica arqueomagnetista. a) Hogar y suelo quemado de la cabaña 1 del yacimiento del Hierro I del Cerro de San Vicente (Salamanca). La flecha roja indica el hogar; b) Hogar del s.XIV d.C., Michoacán (México); c) Secuencia de fumiers neolíticos (Abrigo de El Estillín, Burgos). Los agujeros indican las perforaciones para extraer las muestras con un tubo cilíndrico adaptado para la orientación magnética; d) Horno del s.IX d.C. (Raqqada, Marruecos).

Figure 1. Representative archaeological materials studied with archaeomagnetism. a) Hearth and burnt floor from house 1 at "Cerro de San Vicente" Iron Age I site (Salamanca). Red arrow indicates the hearth; b) Hearth from XIV AD century, Michoacán (Mexico); c) Sequence of neolithic fumiers (El Estillín rock-shelter, Spain). The holes indicate the perforations to extract the samples with a cylindrical tube adapted for magnetic orientation. d) IX century AD kiln from Raqqada (Morocco).

ladrillos, sedimentos quemados o cerámicas. En la Figura 1(a-d) se pueden ver varios ejemplos de materiales arqueológicos que contienen minerales ferromagnéticos, que han sido calentados a alta temperatura y que, por tanto, son capaces de adquirir una TRM. A partir del estudio de la TRM registrada en el horno arqueológico de la Figura 1d, por ejemplo, se han obtenido las características del CMT del s. IX d.C (fecha de la última utilización de esta estructura) en Raqqada, Marruecos (Gómez-Paccard *et al.* 2012). Los materiales ígneos (ej.: lavas volcánicas), también son adecuados para obtener datos arqueomagnéticos pero, desafortunadamente, su presencia en la península ibérica es más escasa.

En los últimos años se están realizando esfuerzos para mejorar y extender en el tiempo las CVPS estudiando materiales arqueológicos quemados cada vez más antiguos. Éste es el caso de los “*fumiers*”, sedimentos antrópicos quemados en cuevas de edad holocena (Brochier 1983). Estas secuencias estratigráficas contienen múltiples eventos de combustión producidos por la quema periódica de materia orgánica (excrementos y restos vegetales) generado por ganado doméstico estabulado en cuevas y abrigos rocosos (Angelucci *et al.* 2009). Son contextos con una amplia distribución geográfica por la Europa mediterránea, disponen de un buen control cronológico independiente (principalmente ^{14}C) y una preservación generalmente buena, lo que les convierte en materiales de interés arqueomagnético (Fig. 1c). Carrancho *et al.* (2013) presentaron una primera curva de variación secular direccional para el Neolítico estudiando episodios quemados de *fumiers* de varias cuevas peninsulares. Sin bien es cierto que aún hay vacíos de datos y tramos temporales por cubrir, el estudio de *fumiers* abre la posibilidad de extender temporalmente la técnica de datación arqueomagnética hasta el Neolítico. Igualmente, se está trabajando también en obtener datos de arqueointensidad absoluta del CMT para cronologías de la prehistoria reciente, con el fin de obtener información de todos los parámetros magnéticos.

2.3. El muestreo

El primer paso para realizar un estudio arqueomagnético de una estructura arqueológica es la recogida y orientación de muestras. Lógicamente, para poder estudiar la dirección del CMT del pasado debemos estudiar estructuras *in situ* que no se hayan movido desde el momento de adquisición de la TRM, portadora de la información que queremos obtener. En este tipo de estudios es particularmente importante determinar la dirección magnética con la mayor precisión posible. Para ello es fundamental tanto tomar un número representativo de muestras bien repartidas por toda la estructura (unas 10-15 muestras suelen ser suficientes) así como orientar las muestras en el sistema geográfico con el menor error posible. La orientación de las muestras debe realizarse siempre antes de extraer la muestra del sitio. Los procedimientos de muestreo son variados y dependen de la naturaleza y grado de cohesión del material elegido. En materiales duros (como algunas rocas o ladrillos) se suelen emplear perforadoras eléctricas o de gasolina acopladas a brocas diamantadas. Sin embargo, en la mayoría de los materiales arqueomagnéticos es necesario recurrir a la recogida de bloques de mano. En la Figura 2(a-b) se pueden ver varios muestreos arqueomagnéticos en los que se ha utilizado escayola para obtener muestras de mano. La escayola evita la rotura del material y permite construir una superficie horizontal que puede orientarse con gran precisión utilizando una brújula solar y/o magnética (Figura 2b). Una vez orientada, la superficie de escayola y el material quemado que se encuentra justo debajo —que es lo que nos interesa ya que es el portador de la señal magnética que queremos estudiar— deben ser extraídos con especial cuidado para evitar perder la orientación de las muestras. En el laboratorio se procede posteriormente a la consolidación y preparación de especímenes (cilíndricos o cúbicos) del tamaño adecuado, generalmente $\sim 10\text{ cm}^3$, para poder ser medidos en los magnetómetros de los laboratorios de paleomagnetismo (Figuras 2c-d).



Figura 2. De la excavación al laboratorio. (a-b) Detalles del proceso de muestreo: para poder orientar las muestras en el sistema de referencia geográfico, con ayuda de escayola se marca en cada muestra la dirección del norte magnético y/o la dirección del sol. La escayola evita la rotura del material y permite generar un plano horizontal. (c-d) Dos tipos de magnetómetro habitualmente utilizados en los laboratorios de paleomagnetismo para medir la termorremanencia (Laboratorio de paleomagnetismo CCiTUB-CSIC, Geociencias Barcelona: Geo3Bcn CSIC).

Figure 2. From the excavation to the laboratory. (a-b) Details of the sampling process: in order to orient the samples in the geographic reference system, with the aid of plaster, the direction of magnetic north and/or sun's direction is marked on each sample. The plaster prevents the material from breaking and allows a horizontal plane to be generated. (c-d) Two types of magnetometer commonly used in paleomagnetism laboratories to measure the thermal remanence (CCiTUB-CSIC Paleomagnetism Laboratory, Geociencias Barcelona: Geo3Bcn CSIC).

A partir del estudio de la TRM “grabada” en los especímenes obtenidos y mediante un tratamiento estadístico de los resultados, se obtiene una dirección e intensidad medias (ambas con un error asociado) que permiten determinar el CMT existente en el pasado en la ubicación geográfica de la estructura estudiada. Es importante señalar que, aunque la intensidad del CMT del pasado puede tam-

bién ser estimada a partir del estudio de objetos desplazados o *ex situ* (como cerámicas o ladrillos), los experimentos de paleointensidad son mucho más largos y delicados que los experimentos arqueomagnéticos en los que sólo se estudia la dirección del campo. Por paleointensidad nos referimos a determinar el valor (módulo) del CMT en el momento del último calentamiento y enfriamiento del

material. Este concepto es distinto a la “intensidad” que exhibe una muestra desmagnetizada en el laboratorio. Es decir, cómo de magnética es. Una explicación detallada de la metodología utilizada en estudios arqueomagnéticos se puede encontrar en Tauxe *et al.* (2010).

2.4. El proceso de datación arqueomagnética

El proceso de datación arqueomagnética se basa en la comparación estadística de la información proporcionada por el estudio paleomagnético llevado a cabo en una estructura arqueológica de edad desconocida con la dada por una CVPS. Estas curvas describen, en función del tiempo, las variaciones sufridas por los tres elementos geomagnéticos (declinación, inclinación e intensidad) para una localización geográfica determinada. Las CVPS juegan un papel importante en la datación y deben ser consideradas como un registro fiable de la variación pasada del CMT. Sin embargo, las CVPS están en continua actualización, ya que nuevos estudios arqueomagnéticos van proporcionando nuevos datos que pueden extender atrás en el tiempo las CVPS ya existentes o bien definir las mejor en ciertos períodos temporales. Para que un dato arqueomagnético sea usado en la construcción de una CVPS es condición necesaria que esté datado por técnicas independientes al método arqueomagnético y además que cumpla unos ciertos criterios de calidad que dependen del protocolo de la medida paleomagnética en laboratorio y de las incertidumbres de los elementos obtenidos (bien sea el error direccional α_{95} o el error de intensidad σ_f).

Las CVPS generadas con datos arqueomagnéticos localizados en un área circular de radio inferior a los 1000 km, como es el caso de la península ibérica, son denominadas CVPS locales y solo pueden ser usadas para datar estructuras arqueológicas localizadas en dicha área. Para construir estas curvas locales, existen diferentes técnicas matemáticas, entre ellas cabe destacar el método bayesiano introducido por Lanos (2004) o el método

bootstrap de Thébault y Gallet (2010). Finalmente, la CVPS generada debe ser referida a una localización geográfica determinada, normalmente el centro del área circular elegida. Para más información sobre las CVPS locales y su construcción, ver Pavón-Carrasco *et al.* (2015).

Además de las CVPS locales, también se pueden obtener curvas de referencia para la datación arqueomagnética a través de reconstrucciones paleomagnéticas regionales o globales. Estas reconstrucciones usan todos los datos arqueomagnéticos disponibles en una cierta región de tamaño continental o a escala global permitiendo conocer las características del CMT en un cierto intervalo temporal. Con estos modelos regionales o globales, podemos sintetizar CVPS en cualquier localización dentro de su región de validez. Esto supone una ventaja respecto a las curvas locales, pues se puede sintetizar las CVPS de referencia en las mismas coordenadas geográficas de la estructura arqueológica que se pretende datar. Una vez elegida la CVPS de referencia para datar la estructura arqueológica, podemos proceder con la datación. Para ello, se compara estadísticamente la dirección e intensidad geomagnética aportada por el estudio paleomagnético llevado a cabo en dicha estructura con la dada por la curva de referencia. Existen diferentes técnicas para llevar a cabo una datación arqueomagnética, desde representaciones visuales hasta las técnicas más sofisticadas basadas en métodos estadísticos. Este último caso es el que se está usando actualmente para la datación arqueomagnética, generando intervalos de edad estadísticamente significativos para fechar la estructura arqueológica. En la sección 4 (Fig. 5), se presenta un ejemplo específico de datación arqueomagnética de una estructura de la península ibérica.

3. Rango temporal de aplicación del método

El rango temporal de aplicación de esta técnica depende del intervalo temporal cubierto por la CVPS usada como referencia. La pri-

mera CVPS para Iberia que cubre los últimos 3000 años fue propuesta por Gómez-Paccard *et al.* (2006). Desde entonces, el aumento del número de datos arqueomagnéticos en la península ibérica ha permitido una actualización de la curva (Molina-Cardín *et al.* 2018; Osete *et al.* 2020) para los últimos tres milenios. La CVPS de Iberia está referida a las coordenadas de Madrid (40.4°N, 3.7°W). En la Figura 3 (panel izquierdo) se muestra la CVPS de los elementos geomagnéticos para la península ibérica para los últimos 3000 años (Molina-Cardín *et al.* 2018). Como se ha mencionado anteriormente, también podemos usar una CVPS de referencia sintetizada a partir de reconstrucciones paleomagnéticas regionales o globales. En este caso, cabe destacar el modelo geomagnético regional para Europa que abarca los últimos 4000 años (Pavón-Carrasco *et al.* 2021). En la Figura 3 (panel derecho) muestra la CVPS sintetizada a partir del modelo regional europeo SCHA.DIF.4k en las coordenadas de Madrid.

Además del rango temporal de aplicación, que hemos visto oscila entre los últimos tres y cuatro milenios en la península ibérica, también se debe analizar qué precisión se puede alcanzar con esta técnica en el rango temporal definido. Esta precisión depende de muchos factores, entre los que cabe destacar los siguientes (para más información sobre el proceso de datación arqueomagnética, ver Pavón-Carrasco *et al.* 2011):

- a) Incertidumbre en la medida del dato arqueomagnético de la estructura a datar: a mayor α_{95} (incertidumbre direccional) o σ_f (error de la arqueointensidad), mayor será la incertidumbre del intervalo de edad estimado en la datación.
- b) Incertidumbre de la CVPS de referencia. Los errores asociados a las curvas de referencia también influyen en la datación final. Curvas muy precisas darán lugar a dataciones más precisas.
- c) Variabilidad del CMT. La propia variación del CMT es un punto clave en la datación.

Variaciones rápidas del campo en uno de sus parámetros (declinación, inclinación o intensidad) proporcionarán intervalos de edad más precisos. Por el contrario, periodos temporales donde no haya variaciones de los elementos geomagnéticos darán lugar a intervalos temporales amplios de datación. Esto ocurre, por ejemplo, con el elemento declinación durante el periodo romano en Iberia (s. III a.C - s. VI d.C), donde la declinación geomagnética prácticamente fue constante (ver Figura 3). Del mismo modo, debido a que esta variabilidad hace que los parámetros geomagnéticos se repitan en el tiempo, los intervalos de edad obtenidos no son únicos. En este caso, es importante contar con asesoramiento arqueológico para conocer el contexto arqueológico de la estructura y poder descartar intervalos de edad incoherentes.

- d) Uso de la dirección arqueomagnética o del vector geomagnético completo: Si solo se dispone de medidas de dirección arqueomagnética (declinación e inclinación), sólo se podrán combinar las funciones de densidad de probabilidad de esos dos elementos, pudiendo aparecer más de un intervalo de datación posible. Esto podría ser mejorado si el estudio paleomagnético también aporta información de la intensidad arqueomagnética. Al combinar las funciones de densidad de probabilidad de los 3 elementos, el número de intervalos de edad propuestos en la datación se reduce notablemente, llegando incluso a obtenerse un único intervalo temporal.

En resumen, la evolución real del CMT en el pasado y cómo ésta es reconstruida con mayor o menor precisión a partir de datos arqueomagnéticos, juega un papel importante en el proceso de datación arqueomagnética. Actualmente, gracias al modelo regional europeo más reciente (SCHA.DIF.4k) se ha podido estimar un umbral mínimo para las incertidumbres en la datación de estructuras arqueológicas en la península ibérica. Estos

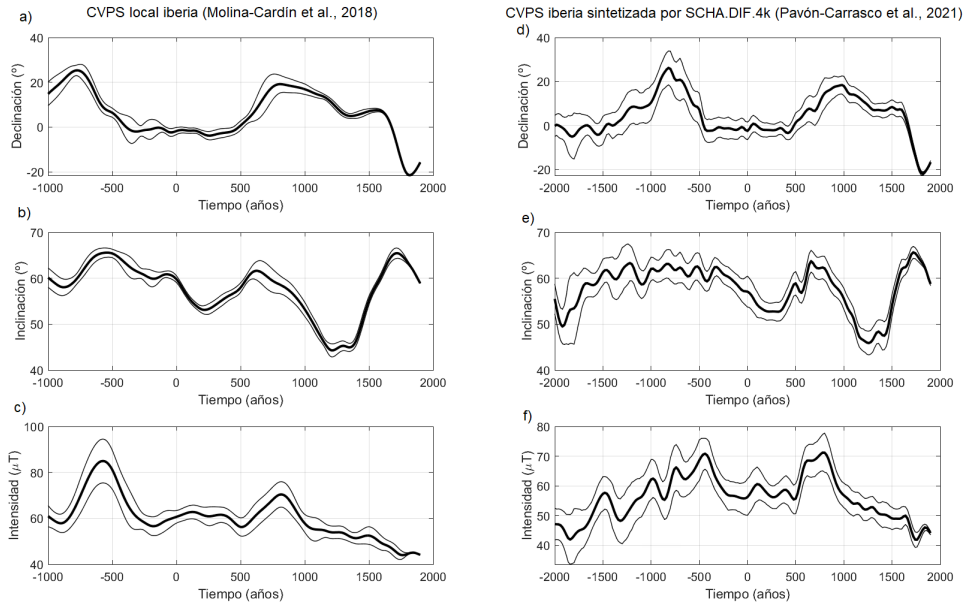


Figura 3. Curvas de variación paleosecular (línea negra con su banda de error al 95% de probabilidad) de los elementos geomagnéticos en las coordenadas de Madrid (a,d: declinación; b,e: inclinación; c,f: intensidad). En el panel izquierdo se representan las curvas locales de los últimos 3000 años dadas en Molina-Cardín et al. (2018), mientras que en el panel derecho se muestran las curvas sintetizadas en Madrid a partir del modelo regional SCHA.DIF.4k (Pavón-Carrasco et al. 2021) que abarca los últimos 4000 años. Gráficos adaptados y traducidos de los trabajos citados.

Figure 3. Paleosecular variation curves (black line with its 95% probability error band) of the geomagnetic elements in Madrid coordinates (a,d: declination; b,e: inclination; c,f: intensity). The left panel represents the local curves of the last 3000 years given in Molina-Cardín et al. (2018), while the right panel shows the curves synthesized in Madrid from the regional model SCHA.DIF.4k (Pavón-Carrasco et al. 2021) that covers the last 4000 years. Graphs adapted and translated from the cited papers.

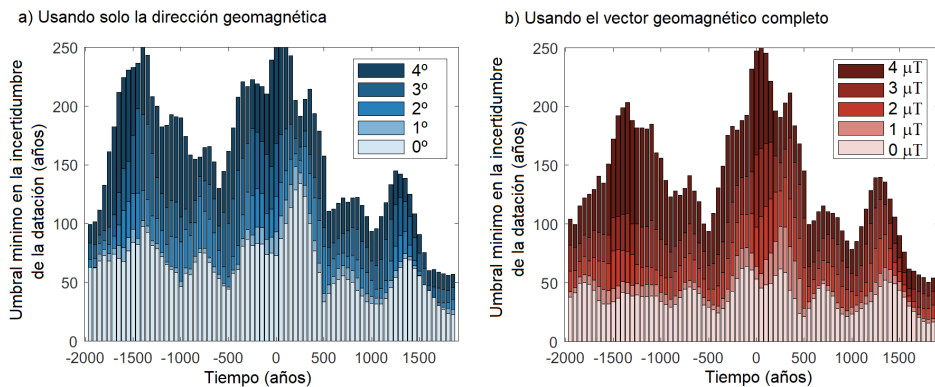


Figura 4. Umbral de la incertidumbre estimada para la datación arqueomagnética en la península ibérica a partir del modelo regional europeo SCHA.DIF.4k. En a) se usan solo los elementos direccionales (declinación e inclinación), mientras que en b) se usa el vector completo (añadiendo la intensidad). Para cada gráfico, el umbral de incertidumbre se ha estimado para diferentes valores de los errores asociados a la dirección (α_{95} en a) y a la intensidad (σ_f en b).

Figure 4. Estimated uncertainty threshold for archaeomagnetic dating in the Iberian Peninsula from the European regional model SCHA.DIF.4k. In a) only the directional elements (declination and inclination) are used, while in b) the full vector (adding intensity) is used. For each graph, the uncertainty threshold has been estimated for different values of the errors associated with direction (α_{95} in a) and intensity (σ_f in b).

umbrales temporales se muestran en la Figura 4, donde un estudio (Pavón-Carrasco *et al.*, 2021) llevado a cabo con CVPS sintéticas generadas por el modelo SCHA.DIF.4k muestra los umbrales de incertidumbre en la datación para diferentes errores en la medida del dato paleomagnético de la estructura a datar. En la Figura 4a se muestra la datación cuando solo son considerados los elementos direccionales (declinación e inclinación) para diferentes valores de α_{95} (desde 0° hasta 4°). En la Figura 4b, se muestra el mismo estudio pero usando el vector geomagnético completo (es decir, dirección más intensidad) para errores de intensidad σ_F entre 0 y 4 μT .

Como se observa en la Figura 4, a día de hoy la técnica de datación arqueomagnética permite datar estructuras arqueológicas en la península ibérica (para el caso de un dato paleomagnético con errores típicos de $\alpha_{95} = 2^\circ$ y $\sigma_F = 2 \mu\text{T}$) con incertidumbres temporales, promediadas en los últimos 4000 años, de unos 100 años si se usan solo los elementos direccionales. Este valor se reduce a 75 años al añadir también el elemento intensidad. Además, es importante señalar que esta incertidumbre media se reduce a unos 50 años si consideramos los últimos 1500 años, debido a la buena definición de la PSVC para dicho rango temporal.

4. Ejemplo en nuestro territorio

Un ejemplo de datación arqueomagnética se muestra en la Figura 5. En ella se data un hogar del yacimiento del Hierro I del “Cerro de San Vicente” (Salamanca), cuya edad concreta era desconocida (Fig. 1a). La datación se ha llevado a cabo usando la CVPS de referencia sintetizada a partir del modelo regional SCHA.DIF.4k en las mismas coordenadas del yacimiento arqueológico. El análisis de 4 bloques orientados de un hogar (32 especímenes) permitió obtener una dirección media (Dec. = 15.1°; Inc. = 52.5°; $k = 477.1$; $\alpha_{95} = 5.6^\circ$). Los análisis de intensidad se realizaron comparando varias técnicas distintas y se obtuvo un valor medio de $74.7 \pm 4.3 \mu\text{T}$ (García-Re-

dondo *et al.* 2021). Para llevar a cabo la datación, se ha usado la herramienta de datación *archaeo_dating* (Pavón-Carrasco *et al.* 2011), que permite datar la estructura a través del análisis de funciones de densidad de probabilidad (ver Figura 5). Para cada elemento geomagnético (declinación, inclinación e intensidad), la herramienta de datación estima su función de densidad de probabilidad, que combinadas entre ellas permite dar un rango de edad para la estructura. En el caso concreto del hogar de este yacimiento, la edad más probable de los intervalos obtenidos se determinó entre el 654 - 575 a.C. (95% probabilidad), como se muestra en la Figura 5.

5. Otras aplicaciones de interés geocronológico

Más recientemente, una aplicación del método que también tiene que ver con la cronología, es el estudio de ocupaciones neandertales en yacimientos de Paleolítico Medio (ca. 250 - 40 ka BP). Estos contextos suelen contener densas acumulaciones de materiales líticos, faunísticos o paleobotánicos asociados a hogares (fuego). Es lo que en la literatura arqueológica técnicamente se conoce como “*palimpsestos*”. Se trata de superficies tan densamente estratificadas que es muy difícil determinar si corresponden a una o varias ocupaciones y, sobre todo, estimar si son temporalmente distintas (diacrónicas) o no. Este es el caso, por ejemplo, de yacimientos como el Abric Romaní (Capellades, Barcelona) o El Salt (Alcoy, Alicante). Considerando cada hogar como un evento aislado y puntual en el tiempo, la aplicación del método aquí se basa en determinar si la dirección arqueomagnética media registrada por varios hogares aflorando en la misma paleosuperficie es distinta para determinar su diacronía o no contemporaneidad (Carrancho *et al.* 2016; Herrejón-Lagunilla 2020). En realidad, aquí no se utiliza el arqueomagnetismo como método de datación (s.s.), ya que esto sólo es posible en áreas geográficas donde existan previamente curvas de variación secular que alcancen cronologías que se pretenden estu-

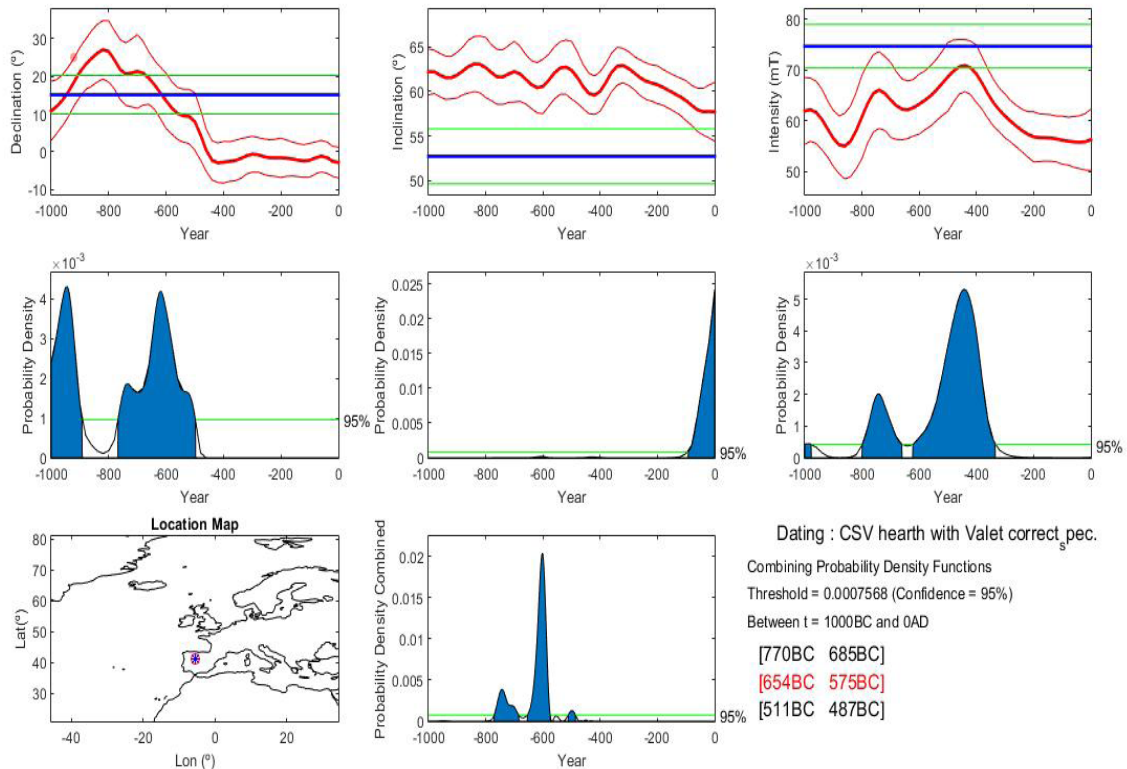


Figura 5. Datación arqueomagnética de un hogar del yacimiento del Cerro de San Vicente (Salamanca, España) ilustrado en la Fig. 1a. En la parte superior se muestran las curvas de referencia para la declinación, inclinación e intensidad (curvas rojas) con su error al 95% (bandas rojas) que son sintetizadas a partir del modelo SCHA.DIF.4k (Pavón-Carrasco et al. 2021). Además, se muestra el dato arqueomagnético que se va a datar (línea azul) con su error (bandas verdes). En los paneles centrales se muestran las funciones de densidad de probabilidad para cada elemento geomagnético (D, I e F). En la parte inferior un mapa con la localización del sitio arqueológico y la datación final obtenida por combinación de las tres funciones de densidad de probabilidad de los tres elementos geomagnéticos considerados. En rojo se indica el intervalo cronológico más coherente con el contexto arqueológico (654 - 575 BC), al 95% de probabilidad.

Figure 5. Archaeomagnetic dating of a hearth from El Cerro de San Vicente site (Salamanca, Spain) illustrated in Fig. 1a. In the upper part, the reference curves for declination, inclination and intensity (red curves) with their 95% error (red bands) are shown, which are synthesized from the SCHA.DIF.4k model (Pavón-Carrasco et al. 2021). In addition, the archaeomagnetic data to be dated (blue line) with its error (green bands) is shown. The central panels show the probability density functions for each geomagnetic element (D, I and F). In the lower part, a map with the location of the archaeological site and the final dating obtained by combining the three probability density functions of the three geomagnetic elements considered. In red is indicated the most plausible chronological interval with the archaeological context (654 - 575 BC), at 95% probability.

diar. Como hemos comentado, la mayoría de registros arqueomagnéticos apenas abarcan los 3-4 últimos milenios. El mérito de esta aplicación está en poder aislar o individualizar eventos de ocupación de hace 50 o 60.000 años y determinar si son temporalmente diacrónicos, lo que para los prehistoriadores es algo muy informativo.

6. Resumen y conclusiones

Este trabajo sintetiza los fundamentos básicos, potencial y limitaciones del arqueomagnetismo como método de datación. La técnica se fundamenta en dos principios básicos. Primero, el campo magnético terrestre experimenta ligeros cambios en dirección e intensidad a lo largo del tiempo a escala regional

en un fenómeno conocido como “*variación secular*”. Segundo, la capacidad que tienen los minerales ferromagnéticos (ej.: óxidos de hierro) de registrar dichos cambios al enfriarse desde alta temperatura (> 500 - 600 °C) mediante la adquisición de una termorremanencia. El estudio de la termorremanencia registrada por materiales arqueológicos o geológicos quemados de los últimos milenios dentro de una misma región, como la península ibérica, permite reconstruir las variaciones del campo magnético terrestre en dicha región a lo largo del tiempo mediante la construcción de curvas y modelos geomagnéticos. Estas curvas y modelos constituyen una potente herramienta de datación. Actualmente es posible datar el último uso (calentamiento) y potencial abandono de una estructura de combustión arqueológica para los últimos 4 mil años con una incertidumbre temporal variable, según diversos factores, pero que puede llegar a los ± 50 años en el mejor de los casos. La colaboración entre geofísicos y arqueólogos es imprescindible para implementar la precisión de la técnica y extender su rango de aplicación temporal.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente a los editores de este volumen especial por contar con nuestra participación para esta contribución. Los autores agradecen el apoyo financiero de los proyectos PID2019-105796GB-I00 y PID2020-113316GB-I00 de la Agencia Estatal de Investigación (AEI/10.13039/501100011033) y de la red de investigación del CSIC ArchaeologyHub CSIC.

Bibliografía

Angelucci, D. E., Boschian, G., Fontanals, M., Pedrotti, A., Vergès, J. M^a. (2009). Shepherds and karst: the use of caves and rock-shelters in the Mediterranean region during the Neolithic. *World Archaeology* 41 (2), 191-214. <https://doi.org/10.1080/00438240902843659>

Brochier, J.E. (1983). Combustion et parage des herbivores domestiques. Le point de vue du

sédimentologue. *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 80 (5), 143-145.

- Carrancho, Á., Villalaín, J.J., Pavon-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Straus, L.G., Verges, J.M., Carretero, J.M., Angelucci, D.E., Gonzalez Morales, M.R., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E. (2013). First directional European palaeosecular variation curve for the Neolithic based on archaeomagnetic data. *Earth Planetary Science Letters* 380, 124-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.031>
- Carrancho, Á., Villalaín, J.J., Vallverdú, J., Carbonell, E. (2016). Is it possible to identify temporal differences among combustion features in Middle Palaeolithic palimpsests? The archaeomagnetic evidence: a case study from level O at the Abric Romani rockshelter (Capellades, Spain). *Quaternary International*, 417, 39–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.083>
- García-Redondo, N., Calvo-Rathert, M., Carrancho, Á., Goguitchaichvili, A., Iriarte, E., Blanco-González, A., Dekkers, M. J., Morales-Contreras, J., Alario-García, C. and Macarro-Alcalde, C. (2021). Further Evidence of High Intensity During the Levantine Iron Age Anomaly in Southwestern Europe: Full Vector Archaeomagnetic Dating of an Early Iron Age Dwelling From Western Spain. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(9), e2021JB022614. <https://doi.org/10.1029/2021JB022614>
- Gómez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., McIntosh, G., Osete, M.L., Catanzariti, G., Ruiz-Martínez, V.C., Núñez, J.I. (2006). First archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula: comparison with other data from Western Europe and with global geomagnetic field models. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 7, Q12001. <https://doi.org/10.1029/2006GC001476>
- Gómez-Paccard, M., McIntosh, G., Chauvin, A., Beamud, E., Pavón-Carrasco, F.J. y Thiriot, J. (2012). Archaeomagnetic and rock magnetic study of six kilns from North Africa (Tunisia and Morocco). *Geophysical Journal International*, 189, 169-186. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05335.x>
- Herrejón-Lagunilla, Á. (2020). *Estudios arqueomagnéticos en materiales quemados prehistóricos de la península ibérica. Aplicaciones geocronológicas y geoarqueológicas*. Tesis Doctoral, Dpto. Física, Universidad de Burgos. 344 pp.
- Jackson, A., Jonkers, A.R.T. and Walker, M.R. (2000). Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *Philosophical*

- Transactions of the Royal Society of London A*, 358, 957-990. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0569>
- Lanos, P. (2004). Bayesian inference of calibration curves, application to archaeomagnetism. In: Buck, C.E., Millard, A.R. (Eds.), *Tools for Constructing Chronologies, Crossing Disciplinary Boundaries*, Lecture Notes in Statistics 177. Springer-Verlag, London, pp. 43-82. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0231-1_3
- Molina-Cardín, A., Campuzano, S. A., Osete, M. L., Rivero-Montero, M., Pavón-Carrasco, F. J., Palencia-Ortas, A., et al. (2018). Updated Iberian archeomagnetic catalogue: New full vector paleosecular variation curve for the last three millennia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 3637–3656. <https://doi.org/10.1029/2018GC007781>
- Osete, M. L., Molina-Cardín, A., Campuzano, S. A., Aguilera-Arzo, G., Barrachina-Ibañez, A., Falomir-Granell, F., et al. (2020). Two archaeomagnetic intensity maxima and rapid directional variation rates during the Early Iron Age observed at Iberian coordinates. Implications on the evolution of the Levantine Iron Age Anomaly. *Earth and Planetary Science Letters*, 533, 116047. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.116047>
- Pavón-Carrasco, F. J., Rodríguez-González, J., Osete, M. L., and Torta, J. M. (2011). A MATLAB tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science*, 38, 408–19. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.09.021>
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Campuzano, S., McIntosh, G., Martín-Hernández, F. (2015). Recent developments in Archeomagnetism: the story of the Earth's past magnetic field. In: *"New Developments in Paleomagnetism Research"* (L. V. Eppelbaum, Ed.). Nova Science Publishers. New York (USA). 99-158. ISBN: 978-1-63483-129-1.
- Pavón-Carrasco, F. J., Campuzano, S. A., Rivero-Montero, M., Molina-Cardín, A., Gómez-Paccard, M., & Osete, M. L. (2021). SCHA. DIF.4k: 4,000 years of paleomagnetic reconstruction for Europe and its application for dating. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB021237. <https://doi.org/10.1029/2020JB021237>
- Tauxe, L. (2010). *Essentials of Rock and Paleomagnetism*. University of California Press (1st Edit.), 512 pp. ISBN: 9780520260313
- Thébault, E., Gallet, Y. (2010). A bootstrap algorithm for deriving the archeomagnetic field intensity variation curve in the Middle East over the past 4 millennia BC. *Geophysical research letters*, 37(22). <https://doi.org/10.1029/2010GL044788>
- Villalaín, J.J. (2016). La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. *Fundamentos del Paleomagnetismo. AEPECT, Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra* 24 (3), 261-274.

Recibido el 5 de abril de 2022

Aceptado el 15 de septiembre de 2022

