

ESTUDIO MULTIMÉTODO DE ARQUEOINTENSIDAD EN MATERIALES CALENTADOS BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

Manuel Calvo Rathert^{1*}, Juan Morales Contreras², Ángel Carrancho³, Avto Gogichaishvili², Pierre Camps⁴
y Mimi Hill⁵

¹ Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos,
Av. de Cantabria, s/n, 09006 Burgos, España

² Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, Instituto de Geofísica, Sede Michoacán UNAM –
Campus Morelia, 58990 Morelia, México

³ Departamento de Historia, Geografía y Comunicación, Universidad de Burgos,
C/ Villadiego s/n, 09001 Burgos, España

⁴ Géosciences Montpellier, CNRS and Université Montpellier 2,
Case 060. 34095 Montpellier, Francia.

⁵ Geomagnetism Laboratory, School of Environmental Sciences, University of Liverpool, United Kingdom

*e-mail: mcalvo@ubu.es

ABSTRACT

A rock-magnetic and archeointensity study has been performed on ceramic, and brick samples baked under controlled conditions in an original kiln from an artisan workshop in western Mexico. Controlled conditions implied knowledge of the Earth's magnetic field value at the site during the experiment, recording of continuous temperature data at four different positions in the kiln during the whole heating-cooling procedure and knowledge of the position of all studied artifacts in the kiln. Rock-magnetic experiments were performed on the raw material used for the preparation of ceramic and brick samples as well as on the synthetic archeological artifacts after baking. The experiments included measurement of thermomagnetic curves, hysteresis curves, isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition curves and first-order reversal curves (FORC). Magnetite seems to be the main carrier of remanence and hysteresis parameter ratios suggest a pseudo-single domain structure, which may also indicate a mixture of single-domain and multidomain grains.

Archeointensity experiments were performed with the following methods: (i) Thellier-type double heating method as modified by Coe (1967); (ii) multispecimen parallel differential pTRM method (Biggin and Poidras, 2006; Dekkers and Böhnell, 2006); microwave method (Walton *et al.*, 1992) and domain-state corrected multiple-specimen paleointensity determination technique (Fabian and Leonhardt, 2010). Determinations with all four methods yield good estimations of the local geomagnetic field strength.

Keywords: Archeointensity, Thellier method, multispecimen method, microwave method, rock-magnetism.

RESUMEN

Se ha realizado un estudio arqueointensidad y magnetismo de las rocas en muestras de cerámicas y ladrillos calentadas bajo condiciones controladas en un horno de un taller artesanal del oeste de México. En concreto, se conocía el valor del campo magnético de la Tierra en el lugar del experimento durante el desarrollo del mismo, se registraron de forma continua las temperaturas en el horno durante todo el experimento en cuatro posiciones diferentes y se conocía la posición de todos los artefactos estudiados en el horno. Los experimentos de magnetismo de las rocas se llevaron a cabo en muestras de la arcilla empleada como materia prima para la preparación de las muestras de cerámica y ladrillo y de los artefactos arqueológicos sintéticos después de su calentamiento. Estos experimentos incluían el registro de curvas termomagnéticas, curvas de histéresis, curvas de adquisición remanencia isoterma (IRM) y curvas FORC. Los resultados indican que el principal mineral portador de la remanencia es magnetita. Los parámetros de la curva de histéresis sugieren una estructura pseudo monodominio, lo cual también puede indicar una mezcla de granos de monodominio



y multidominio.

Los experimentos de arqueointensidad se realizaron empleando los siguientes métodos: (i) método de tipo Thellier modificado según Coe (1967); ii) método multiespécimen (Biggin y Poidras, 2006; Dekkers y Böhnell, 2006); método de microondas (Walton *et al.*, 1992) y método multiespécimen corregido por el estado del dominio (Fabian y Leonhardt, 2010). Las determinaciones con los cuatro métodos proporcionan buenas estimaciones de la intensidad del campo geomagnético local.

Palabras clave: Arqueointensidad, método de Thellier, método multiespécimen método de microondas, magnetismo de las rocas.

1. Introducción

El estudio de la magnetización remanente adquirida por materiales arqueológicos y rocas durante períodos históricos y prehistóricos permite extender el conocimiento de la variación secular geomagnética más allá del registro histórico. Los materiales arqueológicos calentados pueden aportar datos de gran interés para las investigaciones arqueológicas, ya que permiten registrar una magnetización termorremanente (TRM) paralela a la dirección y proporcional a la intensidad del campo magnético de la Tierra (CMT) en el momento en que se calentaron por última vez. En los estudios arqueomagnéticos la recuperación de la dirección de magnetización requiere que los objetos estudiados estén *in situ* o se conozca su posición original. Sin embargo, muchos artefactos, como los fragmentos de cerámicas, ladrillos o tejas, pueden haber sido calentados en una posición desconocida. En tales casos aún puede determinarse su paleointensidad.

Las determinaciones de la paleointensidad implican una dificultad experimental superior a la de las estimaciones de la dirección del CMT. Las determinaciones de paleo- y arqueointensidad precisan que las muestras estudiadas se sometan a experimentos de remagnetización, ya que el campo magnético y la intensidad de la magnetización no tienen el mismo valor, sino que las intensidades de ambas son tan solo proporcionales. Hasta el momento se han propuesto diversas técnicas de determinación de la paleointensidad, pero las basadas en el método original de Thellier (Thellier y Thellier, 1959) se consideran las más fiables, ya que cuentan con un fundamento físico riguroso. Sin embargo, en experimentos de tipo Thellier se deben cumplir varios requisitos para poder obtener un resultado fiable: (i) La remanencia debe ser una TRM; (ii) se deben cumplir las leyes de la reciprocidad, independencia y aditividad de las termorremanencias parciales (Thellier y Thellier, 1959) y (iii) durante los experimentos de determinación de la paleointensidad no deben producirse cambios químicos / mineralógicos o físicos irreversibles, ya que pueden resultar en estimaciones espurias de la paleointensidad. Como las leyes de reciprocidad, independencia y aditividad solo se cumplen en el caso de granos monodominio (SD) y los calentamientos a los que deben someterse las muestras durante los experimentos de paleointensidad frecuentemente dan lugar a alteraciones en los minerales portadores de la remanencia, la tasa de éxito de estos experimentos puede ser limitada. Además, la dispersión observada en las paleointensidades es mucho mayor que en los resultados direccionales, puesto que en ocasiones, resultados obtenidos de determinaciones fallidas pueden ser considerados erróneamente como determinaciones correctas.

Se han propuesto diferentes métodos para evitar o reducir los problemas relacionados con la presencia de granos multidominio (MD) o alteraciones químico-mineralógicas en especímenes sometidos a experimentos de paleointensidad. El método de microondas se basa en la evidencia de que la remanencia puede ser desbloqueada por la aplicación de microondas de alta frecuencia (Walton *et al.*, 1992). La diferencia principal con el calentamiento convencional reside en el hecho de que cuando una muestra se somete a desmagnetización por microondas, la mayor parte de la energía es absorbida por el sistema magnético, mientras que la matriz de la muestra no se calienta significativamente. Como además la aplicación de



microondas tiene lugar durante sólo unos 10 segundos, la probabilidad de alteración durante los experimentos de paleointensidad se reduce claramente.

Biggin and Poidras (2006) y Dekkers y Böhnelt (2006) desarrollaron los protocolos multiespécimen (MS), en los cuales se imparte una termorremanencia parcial (pTRM) en dirección paralela a la NRM a un espécimen tomado de una muestra. Este experimento se lleva a cabo a una temperatura específica y aplicando un campo de un determinado valor. Posteriormente, el experimento se repite a la misma temperatura pero con diferentes campos en otros especímenes de la misma muestra. El campo capaz de generar una magnetización parcial (pTRM) que después de sumada a la magnetización restante de la muestra sea igual a su NRM original, correspondería a la intensidad original del CMT. Con este método, la paleointensidad determinada debería ser independiente de la estructura de dominios, ya que se eliminarían los efectos de historia magnética. La posibilidad de alteración también se reduciría, porque los especímenes se calientan sólo una vez y a temperaturas inferiores a las que dan lugar a alteraciones significativas. Sin embargo, se han observado sobrestimaciones de la intensidad del campo debido a la presencia de granos MD (p. ej. Calvo-Rathert *et al.*, 2016) y podrían ser necesarias etapas experimentales adicionales para la aplicación de correcciones (Fabian y Leonhardt, 2010) para la correcta aplicación de este método.

2. Diseño experimental

Como se ha mencionado previamente, para obtener resultados de arqueointensidad correctos y fiables, es necesario que el material analizado haya registrado fielmente la intensidad del CMT original y que el método empleado para su determinación no haya generado alteraciones físicas, químicas o mineralógicas que hayan producido, de forma inadvertida, resultados incorrectos. Con el fin de analizar la capacidad de diferentes métodos para obtener determinaciones de arqueointensidad fiables, se diseñó un protocolo experimental que incluía la realización de determinaciones de arqueointensidad empleando diferentes métodos. Estos experimentos debían llevarse a cabo bajo condiciones controladas y para ello se emplearon reproducciones de materiales arqueológicos que se magnetizaron en un campo conocido de $B = 41\mu\text{T}$. Los métodos de determinación empleados se basan en diferentes procedimientos experimentales, cada uno de los cuales depende del establecimiento de diferentes estados de equilibrio energético, relacionados con factores como la temperatura, el campo aplicado, el campo de desmagnetizador, etc. en cada una de las etapas del experimento. El hecho de que se basen en principios físicos distintos permite, además, reforzar la fiabilidad de las determinaciones (p.ej., Monster *et al.*, 2015, Calvo-Rathert *et al.*, 2016). En el presente trabajo estos métodos se aplicaron a reproducciones actuales de artefactos arqueológicos mesoamericanos precolombinos, producidos y magnetizados en condiciones controladas. Las reproducciones fueron fabricadas por un taller artesanal de la ciudad de Zinapécuaro (Michoacán, México) fundado en 1815. Este taller emplea procedimientos tradicionales para la fabricación de las cerámicas y la cocción de los materiales pudo llevarse a cabo en un horno abierto original.

De forma independiente se llevaron a cabo experimentos de arqueointensidad en especímenes de las mismas muestras en cuatro laboratorios paleomagnéticos diferentes. En el laboratorio de la Universidad de Burgos (España) se realizó una determinación de la paleointensidad mediante el método de Coe (1967). En el laboratorio paleomagnético de la UNAM en Morelia (México) se llevó a cabo un experimento con el método multiespécimen propuesto, mientras que en el laboratorio paleomagnético de Géosciences Montpellier (Francia) se aplicó el protocolo multiespécimen extendido, que incluye etapas añadidas para las correcciones de fracción y estado de dominios (Fabian y Leonhardt, 2010). Por otra parte, en el laboratorio paleomagnético de Liverpool (Reino Unido) se realizó una determinación de la arqueointensidad mediante el método de microondas.



3. Experimentos de magnetismo de las rocas

Se llevaron a cabo también distintos experimentos de magnetismo de las rocas para la caracterización magnética de los materiales y artefactos estudiados y la determinación de los portadores de la remanencia. También se obtiene información sobre la estabilidad térmica y el tamaño de grano de las muestras, lo cual puede utilizarse como criterio para evaluar la idoneidad de las muestras seleccionadas para las determinaciones de arqueointensidad. Estos experimentos incluían la medición de las curvas de magnetización en función de la temperatura (M_s-T), curvas de histéresis, curvas de adquisición de magnetización remanente isoterma (IRM) y curvas FORC. Estos experimentos se llevaron a cabo en muestras pulverizadas de todas las reproducciones arqueológicas utilizadas en los experimentos de arqueointensidad y sobre un espécimen de la arcilla original

4. Resultados

Los resultados de los experimentos de magnetismo de las rocas indican que el principal mineral portador de la remanencia es magnetita. Las curvas termomagnéticas se caracterizan por una alta reversibilidad (Fig. 1). Los parámetros de la curva de histéresis sugieren una estructura pseudo monodominio, lo cual también puede indicar una mezcla de granos de monodominio y multidominio. Estos resultados sugieren que se trata de muestras adecuadas para la obtención de determinaciones fiables de paleointensidad.

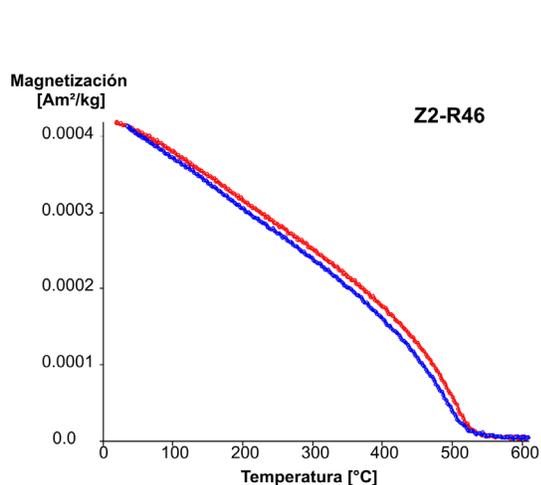


Figura 1. Curva termomagnética de la muestra Z2-R46. En rojo, curva de calentamiento. En azul, curva de enfriamiento.

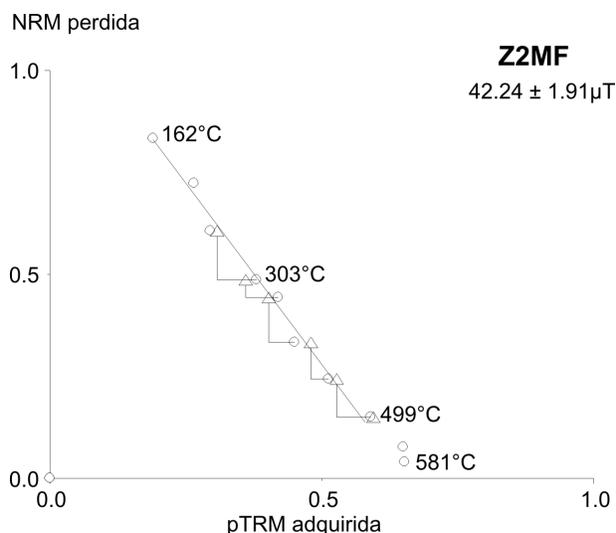
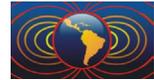


Figura 2. Determinación de paleointensidad realizada en la muestra Z2MF mediante el método de Coe (1967). Los triángulos indican los controles de pTRM (*pTRM-checks*).

La aplicación de los cuatro métodos de determinación de la paleointensidad confirmó estas conclusiones, proporcionando buenas estimaciones de la intensidad del campo geomagnético local. El análisis detallado de los resultados obtenidos aún se halla en curso. Las Figuras 2 y 3 muestran ejemplos de estas determinaciones.

Agradecimientos: Este trabajo se financió con el proyecto BU066U16 (Junta de Castilla y León, España) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Los autores agradecen sobremanera a los alfareros de taller Hernández Cano en Zinapécuaro, Michoacán por las facilidades brindadas durante el desarrollo de trabajo experimental.



Vasija de Zinapécuaro

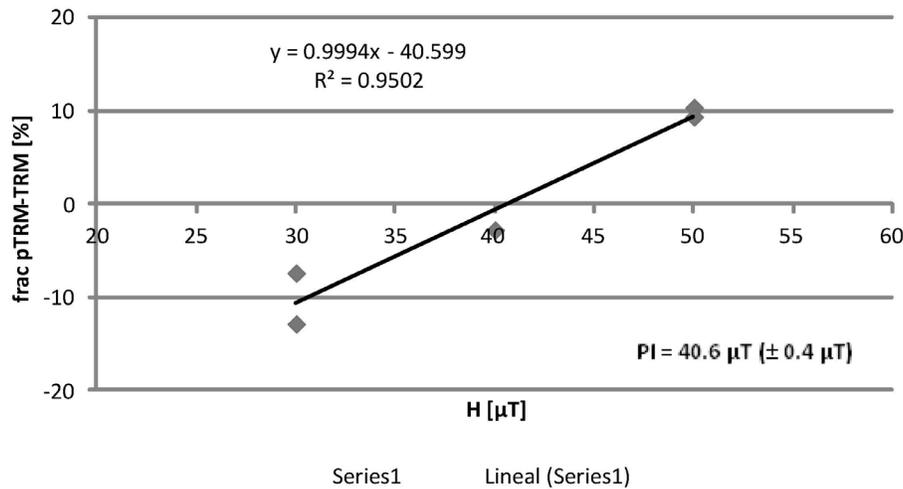


Figura 3. Determinación de paleointensidad realizada en una vasija mediante el método multiespécimen.

Referencias

- Biggin, A., Poidras, T., 2006. First-order symmetry of weak field partial thermoremanence in multidomain ferromagnetic grains. 1. Experimental evidence and physical implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 245, 438-453. DOI: 10.1016/j.epsl.2006.02.035.
- Calvo-Rathert, M., Morales-Contreras, J., Carrancho, Á., Goguitchaichvili, A., 2016. A comparison of Thellier-type and multispecimen paleointensity determinations on Pleistocene and historical lava flows from Lanzarote (Canary Islands, Spain). *Geochem. Geophys. Geosyst.* 17, 3638-3654. doi: 10.1002/2016GC006396
- Coe, R., 1967. Paleointensities of the Earth's magnetic field determined from Tertiary and Quaternary rocks, *J. Geophys. Res.* 72, 3247-3262.
- Dekkers, M.J., Böhnell, H.N., 2006. Reliable absolute palaeointensities independent of magnetic domain state. *Earth Planet. Sci. Lett.* 284, 508-517.
- Fabian, K., Leonhardt, R., 2010. Multi-specimen absolute paleointensity determination: An optimal protocol including pTRM normalization, domain-state correction and alteration test. *Earth Planet. Sci. Lett.* 297, 84-94.
- Monster, M.W.L., de Groot, L.V., Biggin, A.J., Dekkers, M.J., 2015. The performance of various paleointensity techniques as a function of rock-magnetic behaviour - A case study for La Palma. *Phys. Earth Planet. Inter.* 242, 36-49.
- Thellier, E., O. Thellier, 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Geophys.* 15, 285-376.
- Walton, D., Shaw, J., Share, J., Hakes, J., 1992. Microwave demagnetization, *J. Appl. Phys.* 71, 1549-1551.