



LATINMAG LETTERS

August 2014 - Volume 4 - Number 4
LL14-0403Rv

Published on behalf of the Latin American Association of Paleomagnetism and Geomagnetism by the Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

Perspectivas de los estudios de arqueomagnetismo en Sudamérica

C. Greco, A. Gogichaishvili, J. Morales, G. Bocco, C. Gogorza,
A. Rapalini

9 pages, 2 figures

Latinmag Letters can be viewed and copied free of charge at:
<http://www.geofisica.unam.mx/LatinmagLetters/>

Papers contents can be reproduced meanwhile the source is cited

REV-RES PAPER



Perspectivas de los estudios de arqueomagnetismo en Sudamérica

C. Greco^{1*}, A. Gogichaishvili², J. Morales², G. Bocco¹, C. Gogorza³, A. Rapalini⁴

¹ Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México.

² Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México.

³ Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires, (CIFICEN-CONICET), Tandil, Argentina

⁴ IGEBA, CONICET- Universidad de Buenos Aires-, Buenos Aires, Argentina

*Corresponding author, E-mail: catrielgreco@gmail.com

Recibido: Junio 2014; Julio: 2014; Publicado: Agosto 2014

Abstract. Archaeomagnetism is the study of past geomagnetic field variations using bricks, pottery and campfire stones. This is a multidisciplinary work in which archaeologists, historians and geophysicists play important roles. For geophysicists, it contributes to the reconstruction and the study of local and global variations of the geomagnetic field, and it can serve as a dating tool for historical studies. However, this technique goes far beyond the chronological application, as it may provide information for paleoenvironmental studies and the provenance of objects. These studies are well developed in Europe, where there are records since the Middle Ages and a wide variety of recent data; on the contrary, data are scarce in the Southern Hemisphere, although several collaborative initiatives have enabled to make significant progress in recent years.

Keywords: Archeomagnetism, geomagnetic intensity, dating methods, multidisciplinary studies, environmental changes.

Resumen. El Arqueomagnetismo es el estudio de cambios y variaciones en el campo magnético terrestre en el pasado a partir de objetos, estructuras y materiales de construcción antiguos. Se trata de un trabajo multidisciplinario entre arqueólogos, historiadores y geofísicos. Para los geofísicos contribuye a la reconstrucción y al estudio de las variaciones globales y locales del campo geomagnético, mientras que para los estudios históricos, constituye fundamentalmente una herramienta de datación. Sin embargo, esta técnica va más allá de las aplicaciones cronológicas, pudiendo aportar información para los estudios paleoambientales y de procedencia de objetos. Los estudios de este tipo están muy desarrollados en Europa, donde se cuenta con registros desde el medioevo y una enorme cantidad de análisis recientes, pero hasta el momento los antecedentes en el hemisferio Sur son muy escasos, aunque se está progresando rápidamente con la colaboración entre distintas instituciones en los últimos años.

Palabras Claves: Arqueomagnetismo, intensidad geomagnética, métodos de datación, estudios multidisciplinarios, cambios ambientales.



1. Introducción

El Paleomagnetismo es una disciplina científica que estudia el campo magnético terrestre o geomagnético (CMT) a lo largo del tiempo. Es posible retrotraerse en el tiempo debido a que las rocas y otros objetos, que contienen minerales magnéticos, registran las propiedades del CMT en el momento en que se forman o enfrían, entre otros fenómenos físicos. Dentro de esta disciplina, el Arqueomagnetismo se refiere al mismo estudio realizado a partir de materiales arqueológicos. Se trata de un trabajo multidisciplinario entre arqueólogos, historiadores y geofísicos. Como desarrollaremos más adelante, para los geofísicos contribuye a la reconstrucción y al estudio de las variaciones globales y locales del CMT, mientras que para los estudios históricos constituye fundamentalmente una herramienta de datación. Sin embargo, el arqueomagnetismo va más allá de las aplicaciones cronológicas, pudiendo aportar información para los estudios paleoambientales y de procedencia de objetos.

Los estudios de este tipo están muy desarrollados en Europa, donde se cuenta con registros desde el medioevo y una enorme cantidad de análisis recientes, pero hasta el momento los antecedentes en el hemisferio Sur son muy escasos (según consta en las compilaciones de Genevey et al. (2008) y Korte et al. (2009), aunque se está progresando rápidamente con la colaboración de distintas instituciones latinoamericanas.

2. Fundamentos del método

El arqueomagnetismo depende de dos fenómenos físicos: En primer lugar, el campo magnético de la tierra (CMT) cambia con el tiempo tanto en intensidad como en dirección (inclinación y declinación). La declinación es el ángulo, medido sobre un plano horizontal, entre el norte magnético y el geográfico; la inclinación es el ángulo formado por el vector de campo geomagnético y el plano horizontal (Aitken, 1990); la intensidad del campo determina por ejemplo la fuerza de atracción de una aguja de brújula al polo magnético, del mismo modo la fuerza de la magnetización adquirida por los minerales magnéticos (Linford, 2006).

En segundo lugar, ciertos eventos específicos pueden causar que los minerales magnéticos presentes en objetos arqueológicos queden permanentemente magnetizados, registrando las propiedades del CMT correspondientes a ese momento (Linford, 2006).

El campo magnético principal o dipolar de la Tierra se origina por movimientos magnetohidrodinámicos en el núcleo externo del planeta (Fig. 1). Las observaciones realizadas en los últimos siglos indican que hay cambios en el CMT a largo plazo y de escala global, conocidos como variación secular. Se trata fundamentalmente del movimiento de los polos magnéticos alrededor del polo geográfico y de cambios en la magnitud o intensidad del campo. Asimismo, hay otras oscilaciones y perturbaciones del campo principal que tienen influencias más localizadas, de allí que las mediciones hechas en distintos puntos del planeta sean diferentes y se necesiten estudios regionales para calibrar las variaciones seculares (Aitken, 1990; Linford, 2006).

El estudio magnético en objetos y estructuras arqueológicas e históricas constituye una herramienta de datación, aunque como veremos más adelante también cuenta con otras aplicaciones no cronológicas.



Algunos materiales como cerámicas, ladrillos, tejas, estucos o pinturas murales contienen partículas magnéticas –fundamentalmente, óxidos de hierro como magnetita, maghemita y hematita– que, ante fenómenos físicos como la combustión o el desecamiento registrarán las propiedades del campo magnético terrestre (Linford, 2006). En ese sentido, a diferencia de otras técnicas como el radiocarbono que permiten calcular una magnitud de tiempo, ésta se trata de una transferencia de cronología (Aitken, 1990) o de un método correlacional, que establece equivalencias de edad usando propiedades independientes del tiempo (Colman et al., 1987). Para ello es necesaria una curva de referencia de validez regional construida en base a otras mediciones. Cuando la curva está compuesta de una gran cantidad de datos comparativos, la determinación de edad de un nuevo objeto puede ser de mayor precisión que con otras técnicas de datación.

Hay dos mecanismos principales de magnetización que afectan a los objetos y sedimentos arqueológicos e históricos, la remanencia detrítica –también llamada depositacional– (DRM) y la termorremanente (TMR). En el primer caso, las partículas que decantan, por ejemplo en un ambiente sedimentario acuático, pueden orientarse de acuerdo al CMT. El segundo, que es el que nos interesa particularmente, se debe a la acción del calor y energías de índole cuántica. Los cristales de los óxidos de hierro y de titanio presentes en los objetos –también en rocas ígneas– están magnetizados en una determinada intensidad y una dirección inicialmente

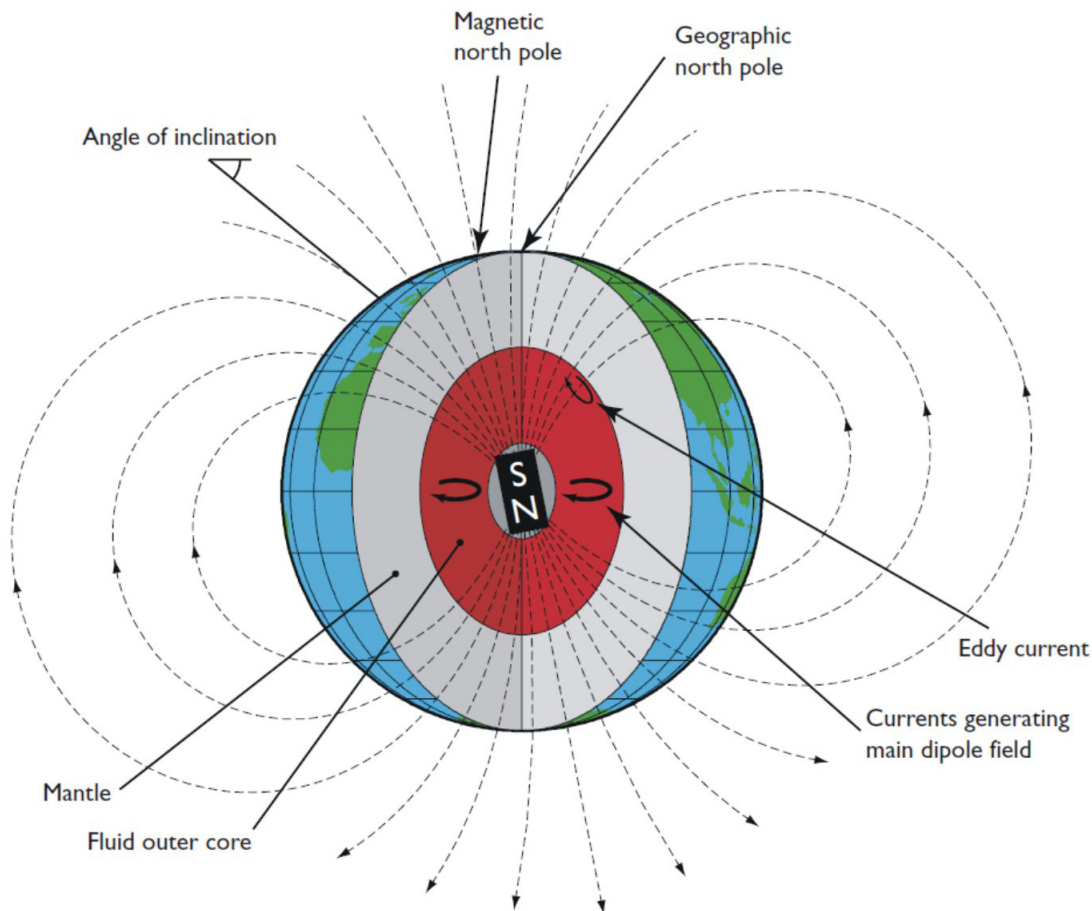


Figura 1. Campo magnético terrestre (Tomado de Linford 2006: Figura 1). El campo magnético principal dipolar de la tierra se marca con líneas de rayas y se origina en el núcleo externo.



aleatoria (estado paramagnético o superparamagnético, Tauxe, 2014). Al descender la temperatura, los tiempos de relajación de la remanencia crecen exponencialmente y una proporción de los cristales y/o dominios magnéticos registrarán una magnetización remanente paralela y proporcional al campo magnético ambiente que perdurará por tiempos geológicos. Si la temperatura se vuelve a elevar, la agitación térmica permite a algunos dominios reorientar su dirección hacia la nueva del CMT y la intensidad se resetea. Ambas quedarán “grabadas”, de una forma débil pero permanente, con el enfriamiento (Aitken, 1990).

El primer método de datación se basa en el hecho de que la dirección del campo magnético ha variado con el tiempo y se denomina arqueodireccional. Esta técnica implica establecer la posición del polo norte magnético aparente indicada por la declinación y la inclinación del campo en una muestra y determinar cuándo en el pasado el norte magnético local estaba en esa posición. Para esto el artefacto debe de haber quedado en la misma posición que aquella en la cual obtuvo su remanencia, limitando lo datable a estructuras no portables (Linford, 2006). El segundo método o de arqueointensidad infiere la intensidad del campo terrestre al momento en el que un artefacto adquirió su remanencia, midiendo la magnitud de la magnetización en el artefacto (Linford, 2006.). Una de las principales ventajas de este último es que puede aplicarse a objetos móviles como material cerámico fragmentario. Éste último método es el que prevalece en los estudios arqueomagnéticos de América y fundamentalmente en América del Sur, donde es más dificultoso encontrar muestras en su orientación original.

Es necesario tomar en cuenta que en el estudio de la termorremanencia el evento datado es el de la última vez en que la muestra se calentó a una temperatura alta (Linford, 2006), es decir que en el caso de una vasija de uso doméstico no necesariamente se trata del momento de su confección. Si la temperatura de calentamiento final del objeto fue más baja que la alcanzada en las previas, se podrían datar las distintas exposiciones al fuego, aunque cuando la última es más alta borra las señales previas.

3. Preparación de muestras y proceso de medición

Dependiendo del tipo de material a analizar, la toma de muestras puede ser diferente. En el caso de objetos portables que no se encuentran en su lugar de cocción, como cerámicas, tejas o ladrillos, la muestra es seleccionada por los investigadores y enviada al laboratorio para su procesamiento. Habitualmente es necesario un fragmento pequeño del objeto, el que se someterá al método de determinación de arqueointensidad. En cambio, cuando se trata de material in situ en el lugar de cocción, como las paredes de un horno, se puede utilizar asimismo el método arqueodireccional.

Las mediciones en sí mismas son dificultosas y consumen bastante tiempo, siendo necesario experimentos repetidos y un alto número de muestras, o subdividir la muestra en varias submuestras más pequeñas. También puede suceder que los minerales presentes en los fragmentos tengan baja susceptibilidad magnética y por lo tanto no registren correctamente la remanencia (Aitken, 1990).

Por un lado, el método arqueodireccional implica establecer la posición del polo norte magnético aparente indicada por la declinación y la inclinación del campo en una muestra y determinar cuándo en el pasado el norte magnético local estaba en esa posición. En muchos lugares de Europa se cuenta con registro de las posiciones del Polo para los últimos 400 años, permitiendo una datación muy precisa con esta técnica (Linford, 2006).



Por otro lado, para el método de arqueointensidad, los fragmentos se marcan con una orientación arbitraria de referencia y se dividen en especímenes de aproximadamente 1cm³ que se orientan de distintas maneras. Cada espécimen se monta en contenedores de sal compactada para poder tratarlo como un núcleo paleomagnético. En el proceso de medición se pasará por distintas etapas e instrumentos especializados del laboratorio de paleomagnetismo

La intensidad medida en una muestra, a diferencia de la dirección, no es igual a la del campo magnético antiguo sino proporcional a la misma. Debido a ello puede ser determinada comparando la magnetización que se encuentra en la muestra, con la TRM que ésta adquiere luego de calentarla y enfriarla en un campo magnético conocido de laboratorio (Thellier y Thellier, 1959; Coe, 1967; Aitken, 1990). Como limitaciones se puede mencionar que, además de la variación regional introducida por los componentes no-dipolo del CMT (como las corrientes Eddy en la Fig. 1), la magnetización puede alterarse por la composición mineralógica, la estructura cristalina, la temperatura de cocción original, la anisotropía y las tasas de calentamiento/enfriamiento (Linford, 2006). Sin embargo la técnica de medición corrige estos factores y permite obtener como resultado un valor de intensidad expresado en microteslas (μT), que es el promedio de las varias submuestras en las que se dividió un mismo fragmento. Ese resultado se puede comparar con una curva de variación secular de intensidad con validez para la región en cuestión y estimar de esa manera la antigüedad de la muestra, o más precisamente la última exposición al fuego de la misma.

4. Resultados en América del Sur

Aunque en América del Sur se cuenta con una larga tradición de estudios de paleomagnetismo, hasta el momento son muy pocos los que se dedicaron al ámbito del arqueomagnetismo. En Argentina se han estudiado las propiedades magnéticas de objetos de obsidiana para establecer la procedencia de fuentes de aprovisionamiento (Vázquez *et al.*, 2001) o se han estudiado perfiles sedimentarios lacustres cuyos niveles más tardíos corresponden a momentos de ocupación humana en el continente.

En cuanto a los estudios relacionados con la cronología, aunque se cuenta con antecedentes desde los años sesenta del siglo XX, los resultados de las modernas y más confiables técnicas se limitan a menos de 60 determinaciones y a muy pocas localizaciones. En Perú (Shaw *et al.*, 1996) y Ecuador (Bowles *et al.*, 2002) se realizaron estudios de intensidad magnética en fragmentos de cerámica arqueológica prehispánica, aunque se trata de investigaciones que no tuvieron continuidad. Más recientemente se reportaron los primeros resultados de intensidad en sitios históricos del noreste de Brasil (Hartmann *et al.*, 2010), a partir de 14 grupos de ladrillos de la ciudad de Salvador de Bahía, abarcando una cronología desde mediados del siglo XVI a principios del siglo XIX. La comparación de los distintos resultados y localizaciones ofrece patrones que no son necesariamente comparables, probablemente debido a componentes no-dipolares del campo magnético o a la distancia entre las regiones (Goguitchaichvili *et al.*, 2012).

En la Argentina, desde hace unos años se comenzó con un programa de análisis de intensidad magnética de objetos históricos y arqueológicos, dentro del Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LINMA), del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, dirigido por uno de los autores (A. Goguitchaichvili). Actualmente ya se han publicado los primeros resultados al tiempo que se encuentra en procesamiento nueva información de otras localizaciones.



Por un lado, para la región de humedales del Paraná Inferior se analizaron fragmentos de cerámica del Holoceno tardío (con dataciones radiocarbónicas asociadas de 1640 a 730 años antes del presente), con resultados similares a otros obtenidos en el Sur de Brasil, pero que se alejan de lo esperado a partir de modelos globales, lo que muestra la necesidad de multiplicar los estudios en distintos sectores (Ibíd.).

Por otro lado, del poblado prehispánico de Rincón Chico (valle de Santa María, Catamarca), que fuera ocupado entre el siglo X d.C. y la conquista española, se obtuvieron resultados de intensidad para 25 fragmentos de cerámica (Fig. 2), cuya cronología se contextualizó a partir del estudio tipológico y de 36 dataciones de radiocarbono (Goguitchaichvili *et al.*, 2011). Estos resultados aún no pueden usarse para estimar cronología por sí mismos, pero son una importante contribución a la conformación de una curva de variación secular de la intensidad magnética con aplicación para la región.

5. Aplicaciones como proxy paleoambiental

Las variaciones del campo geomagnético observadas en la superficie de la Tierra pueden revelar algunos procesos físicos del interior de nuestro planeta como los fenómenos magneto-hidrodinámicos que actúan en el núcleo y en el límite manto-núcleo de la Tierra (Goguitchaichvili *et al.*, 2011). Asimismo, recientes resultados también sugirieron que puede haber conexiones entre esas fluctuaciones y los cambios climáticos a lo largo del Holoceno, ya que el CMT conforma una barrera que modula la incidencia de la radiación cósmica en interacción con la atmósfera (Gallet *et al.*, 2006; Courtillot *et al.*, 2007). Los episodios

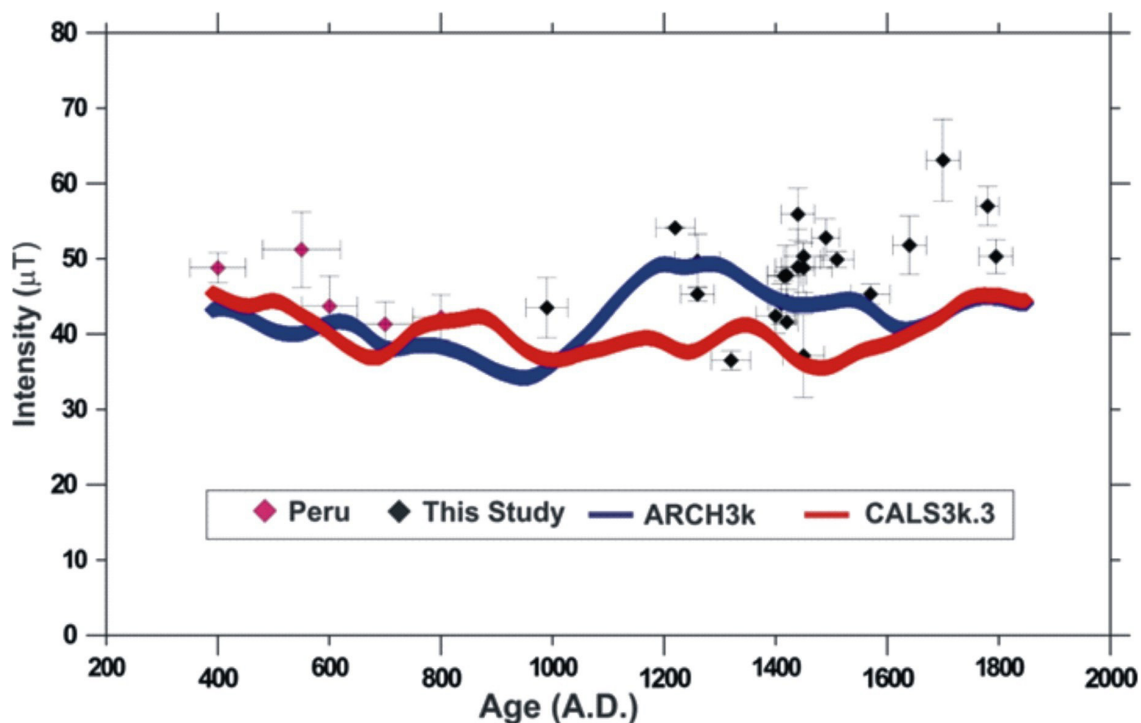


Figura 2. Valores medios de arqueointensidades de Rincón Chico, Catamarca, comparados con resultados similares de Perú¹ y las predicciones de los modelos CALS3k.3 y ARCH3k² (Tomado de Goguitchaichvili *et al.* 2011: Figura 4b).

¹ Shaw *et al.*, 1996.

² Donadini *et al.*, 2009.



fríos, al menos en el Atlántico Norte de donde hay abundante información, son sincrónicos con el incremento en la intensidad magnética y a la inversa, los episodios cálidos con un decrecimiento.

Si observamos los datos de Rincón Chico, sumados a otros disponibles para América del Sur y a las predicciones de modelos globales (Fig. 2), puede mencionarse que los intervalos de tiempo entre alrededor de 1150 y 1350 d.C. y de 1450 a 1600 d.C. se caracterizan por un decrecimiento de la intensidad geomagnética, mientras que se observa cierto incremento desde ca. 1600 hasta 1700 d.C. Mientras que el decaimiento en la intensidad desde aproximadamente el siglo XVII parece ser una característica general del CMT global, otro decaimiento alrededor de 1150-1350 podría relacionarse a condiciones de aumento de la temperatura detectadas en otros lugares del continente durante la denominada Anomalía Climática Medieval. Los estudios paleoambientales no pueden ser realizados en base a un único indicador y la información comparativa disponible también es escasa en esa región de la Argentina, sin embargo distintos autores coinciden en identificar la presencia de esa anomalía en concordancia con condiciones de intensa aridez (Garalla, 2003; Gómez-Augier y Caria, 2009; Sampietro-Vattuone y Neder, 2011).

Por el momento se están planteando correlaciones a grandes rasgos entre registros, pero la profundización en este tipo de estudios es un campo prometedor tal como se está realizando en otras latitudes (Gallet *et al.*, 2006; Courtillot *et al.*, 2007; Pétronille *et al.*, 2012; entre otros).

6. Consideraciones finales

El Arqueomagnetismo es una técnica interdisciplinaria relativamente joven, sobretudo en el contexto latinoamericano, por lo cual todavía nos encontramos en una etapa exploratoria para revelar todo el potencial que tiene para aportar tanto a la Historia y la Arqueología como a las Geociencias. Hemos mencionado su uso más conocido como herramienta de datación, pero también nuevas perspectivas en los análisis de procedencia de objetos y materias primas así como en la reconstrucción paleoambiental.

Aunque hasta el momento se han realizado en proporción más análisis de magnetismo en objetos arqueológicos prehispánicos, el estudio de materiales de los siglos XVI a XIX –como fragmentos de alfarería, tejas, ladrillos, pisos y paredes de hornos– resulta promisorio porque es un período para el que no hay observaciones directas del CMT en la región. Además, los documentos históricos pueden ser muy precisos para contextualizar cronológicamente aquellos objetos y avanzar en la construcción de una curva de variación secular fiable para ese periodo.

Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado por proyectos de Conacyt n° 129653 y DGAPA-PAPIIT IN105214. Los autores agradecen por el financiamiento parcial recibido al Ministerio de Educación de la República Argentina – Secretaría de Políticas Universitarias – Línea: Redes VI. Proyecto: Formación de una Red de Trabajo para la Ampliación de la Base de Datos Paleomagnéticos de Latinoamérica.



Bibliografía

- Aitken, M. J., 1990. *Science-based Dating in Archaeology*. Longman, Londres, 274 pp.
- Bowles, J., Gee, J., Hildebrand, H. J., Tauxe, L., 2002. Archeomagnetic intensity results from California and Ecuador: evaluation of regional data. *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 967-981.
- Coe, R. S., 1967. Paleo-intensities of the Earth's magnetic field determined from tertiary and quaternary rocks. *Journal of Geophysical Research*, 72 (12), 3247-3262.
- Colman, S. M., Pierce, K. L., Birkeland, P. W., 1987. Suggested Terminology for Quaternary Dating Methods. *Quaternary Research*, 28, 314-319.
- Courtillot, V., Gallet, Y., Le Mouél, J. L., Fluteau, F., Genevey, A., 2007. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate?. *Earth and Planetary Science Letters*, 253, 328-339.
- Gallet, Y., Genevey, A., Le Goff, M., Fluteau, F., Eshraghi, S. A., 2006. Possible impact of the Earth's magnetic field on the history of ancient civilizations. *Earth and Planetary Science Letters*, 246, 17-26.
- Garalla, S., 2003. Análisis polínico de una secuencia sedimentaria del Holoceno Tardío en el Abra del Infiernillo, Tucumán, Argentina. *Polen*, 12, 53-63.
- Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C. G., Korte, M., Hulot, G., 2008. ArcheoInt: An upgraded compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, DOI: 10.1029/2007gc001881.
- Goguitchaichvili, A., Greco, C., Morales, J., 2011. Geomagnetic field intensity behavior in South America between 400 AD and 1800 AD: First archeointensity results from Argentina. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 186, 191-197.
- Goguitchaichvili, A., Loponte D., Morales, J., Acosta, A., 2012. The archeointensity of the Earth's magnetic field retrieved from pampean ceramics (South America). *Archaeometry*, 54 (2), 388-400.
- Gómez-Augier, J. P. y Caria, M., 2009. La simbología prehispánica e histórica del Noroeste Argentino y su relación con los cambios paleoambientales. *Anales del Museo de América*, XVII, 96-105.
- Hartmann, G., Genevey, A., Gallet, Y., Trindade, R., Etchevarne, C., Le Goff, M., Afonso, M. C., 2010. Archeointensity in Northeast Brazil over the past five centuries. *Earth and Planetary Science Letters*, 296 (3-4), 340-352.
- Korte, M., Donadini, F., Constable, C. G., 2009. Geomagnetic field for 0–3 ka: 2. A new series of time-varying global models. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10, DOI: 10.1029/2008GC002297.
- Linford, P., 2006. *Archaeomagnetic Dating. Guidelines on producing and interpreting archaeomagnetic dates*. English Heritage Publishing, Portsmouth, 31 pp.
- Pétronille, M., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Carvallo, C., Hueda-Tanabe, Y., 2012. Absolute geomagnetic intensity determinations on Formative potsherds (1400–700 BC) from the Oaxaca Valley, Southwestern Mexico. *Quaternary Research*, 78 (3), 442-453.
- Sampietro-Vattuone, M. M., Neder, L., 2011. Quaternary landscape evolution and human occupation in northwestern Argentina. *Geological Society, London, Special Publications*, 352, 37-47.
- Shaw J., Walton, D., Yang, S., Rolph, T. C., Share, J. A., 1996. Microwave archaeointensities from Peruvian ceramics. *Geophysical Journal International*, 124 (1), 241-244.



- Tauxe L., 2014. Essentials of Paleomagnetism, Third Web Edition. <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/Essentials/>
- Thellier E., y Thellier, O., 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annales Geophysicae*, 15, 285-376.
- Vázquez C. A., Nami, H. G., Rapalini, A. E., 2001. Magnetic Sourcing of Obsidians in Southern South America: Some Successes and Doubts. *Journal of Archaeological Science*, 28, 613-618.