



EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL CMT COMO UNA HERRAMIENTA INTERDISCIPLINARIA EN LOS ESTUDIOS HOLOCENOS DEL CENTRO DE MÉXICO

Nayeli Pérez-Rodríguez^{1*}, Juan Morales^{2,3}, Rubén Cejudo-Ruiz², Felipe García-Tenorio⁴,
Avto Goguitchaichvili^{2,3}

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, Unidad Michoacán, Morelia, México

² Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA), Instituto de Geofísica, UNAM, Unidad Michoacán, Morelia, México

³ Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN), Instituto de Geofísica, UNAM, Unidad Michoacán, Morelia, México.

⁴ Instituto de Geofísica, UNAM, Unidad Michoacán, Morelia, México.

*e-mail: nayeli.p.r@comunidad.unam.mx

ABSTRACT

Results of three comprehensive studies in Central Mexico based in paleomagnetism, archeomagnetism and rock magnetism are shown. The usefulness of the studies of the Earth's Magnetic Field variations in other branches of Geosciences and Anthropological Sciences is highlighted.

Keywords: Interdisciplinarity, Mexico, archeomagnetism, paleomagnetism, rock magnetism.

RESUMEN

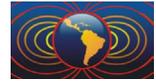
Se presentan los resultados de tres estudios integrales en el centro de México, en los que, mediante experimentos de paleomagnetismo, arqueomagnetismo y magnetismo de rocas se muestran algunas de las aplicaciones que tienen los estudios de la variación del Campo Magnético Terrestre (CMT) en otras ramas de las Geociencias y en las Ciencias Antropológicas.

Palabras Clave: Interdisciplinaria, México, arqueomagnetismo, paleomagnetismo, magnetismo de rocas.

1. Introducción

Uno de los principales objetivos de los estudios geomagnéticos es la caracterización del comportamiento del CMT a lo largo de su historia. Los primeros registros directos de las variaciones en declinación e inclinación del campo geomagnético se realizaron durante el siglo XVI, mientras que los primeros registros de intensidad se reportan hasta finales del siglo XIX (Butler, 1992), por lo que, si se requiere de un registro más amplio en el tiempo, es necesario recurrir a observaciones indirectas obtenidas del análisis paleomagnético de diversos materiales geológicos, o materiales manufacturados a partir de los mismos.

A pesar de representar un registro discreto, se ha demostrado que tanto los materiales volcánicos como los artefactos arqueológicos quemados proveen información de gran calidad de la dirección e intensidad del CMT presente al momento de su formación o fabricación (ver Dunlop, 2011 y referencias en este); esto debido a la adquisición de una Magnetización Remanente Térmica (TRM) durante su enfriamiento. No obstante, un gran porcentaje de los estudios paleomagnéticos proporcionan únicamente información direccional del vector de remanencia del campo geomagnético. Esto se puede asociar, principalmente, al hecho de que la determinación de paleodirecciones conlleva un proceso más sencillo comparado con el proceso que implica la obtención de paleointensidades (PI) que, además de ser una determinación indirecta que no es equivalente si no proporcional a la fuerza del campo aplicado, depende de una gran cantidad de factores intrínsecos en el material de estudio (*e.g.*, anisotropía y tamaño de grano) y de otros factores inherentes a los procesos ex-



perimentales (*e.g.*, cambio en la composición mineralógica de las muestras por calentamiento, variaciones en los ritmos de enfriamiento, etc.). Esto ha derivado en el desarrollo de una gran cantidad de metodologías para la determinación de PI, dentro de las cuales, las que se basan en las técnicas desarrolladas por Thellier (Thellier y Thellier, 1959) son las más aceptadas dentro de la comunidad paleomagnética.

En este trabajo se presentan los resultados de los experimentos de paleomagnetismo, arqueomagnetismo y magnetismo de rocas llevados a cabo en tres sitios distintos en México, dentro de la denominada Faja Volcánica Transmexicana (Figura 1); el volcán Popocatepetl, el volcán El Metate y el Malpaís de Zacapu. La aplicación de distintas técnicas para la obtención de paleointensidades con sus respectivos controles para detección de cambios mineralógicos (Riisager y Riisager, 2001), ritmo de enfriamiento (Halgedahl *et al.*, 1980) y anisotropía (Veitch *et al.*, 1984) complementados con la caracterización magnética de las muestras y la desmagnetización por Campos Alternos (AFD) para la determinación de paleodirecciones, proporcionan datos de gran calidad, que además de ser útiles para la valoración de la evolución del CMT, son de interés para otras disciplinas, como la vulcanología, la arqueología y la antropología.

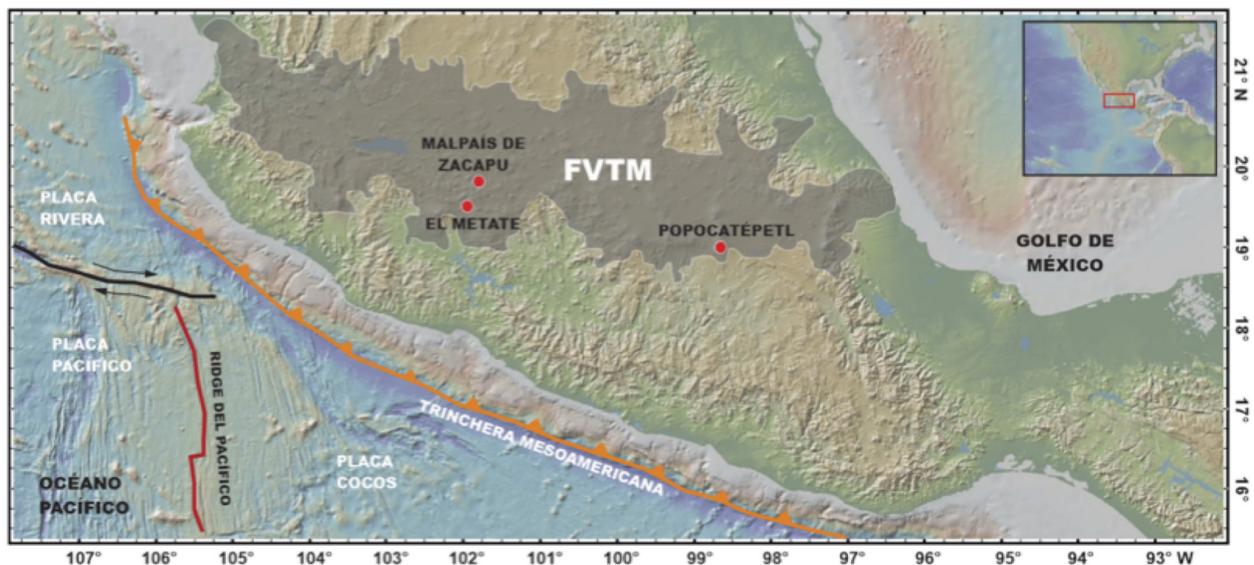


Figura 1. Localización de los sitios de estudio dentro de la Faja Volcánica Transmexicana y su contexto tectónico.

2. Metodología

Tras el trabajo de campo en los distintos sitios de estudio se prepararon las muestras para su tratamiento en laboratorio; las cerámicas arqueológicas se cortaron en 6 fragmentos, los cuales se encapsularon en pastillas de sal de 2.5 cm diámetro por 2 cm de largo. Los núcleos de los materiales geológicos (lavas y escorias) extraídos en campo mediante una perforadora portátil se seccionaron en fragmentos de 2 cm de largo. El trabajo en laboratorio se inició con la caracterización magnética de los materiales mediante el uso de una Balanza Traslacional de Campo Variable (VFTB) con la que se realizaron experimentos de adquisición de IRM, campo inverso, curvas de histéresis y curvas termomagnéticas. Posteriormente se realizaron experimentos de AFD para la obtención de paleodirecciones, mientras que la determinación de PI se realizó mediante los métodos de Thellier – Coe (TC) y Múltiples Especímenes (ME). Finalmente, se llevaron a cabo tres calentamientos adicionales para determinar el factor de corrección por ritmo de enfriamiento y 6 pasos de magnetización anhisterética para determinar el factor de corrección por anisotropía.



3. Sitios de estudio

a) Volcán Popocatepetl

El volcán Popocatepetl es un estratovolcán ubicado entre los límites de los estados de México, Puebla y Morelos. Es un volcán activo, considerado el de mayor riesgo dentro del territorio nacional debido a la gran cantidad de personas que habitan en sus alrededores. Se cuenta con registro de su actividad desde hace más de 400 000 años. Su último período de actividad inició en 1994 y se mantiene hasta la actualidad. Para el estudio de este volcán se consideraron de interés sus últimas tres erupciones Plinianas: La erupción Pliniana del Pre-Cerámico Superior (EPPCS, ~ 5000 años AP); la erupción Pliniana del Cerámico Inferior (EPCI, ~2150 años AP); y la Erupción Pliniana del cerámico Superior (EPCS, ~1100 AP) (Siebe *et al.*, 1996).

Durante el trabajo de campo se llevó a cabo el levantamiento de una columna estratigráfica de sus últimas tres erupciones Plinianas. Se recogieron 44 núcleos paleomagnéticos de 5 sitios, 20 de fragmentos de escorias pertenecientes a dos flujos piroclásticos, y 24 de tres flujos de lava distribuidos a lo largo de la columna estratigráfica. Adicionalmente, durante el trabajo de campo se recogieron fragmentos cerámicos intercalados entre los depósitos vulcanosedimentarios (Figura 2). Todos los materiales muestreados fueron caracterizados magnéticamente mediante una VFTB, se sometieron a experimentos de AFD para la determinación de paleodirecciones y se determinaron sus PI mediante el método de TC. Al finalizar el protocolo para determinación de PI se realizó la corrección por ritmo de enfriamiento, y en las cerámicas se determinó adicionalmente la corrección por efectos de anisotropía magnética.

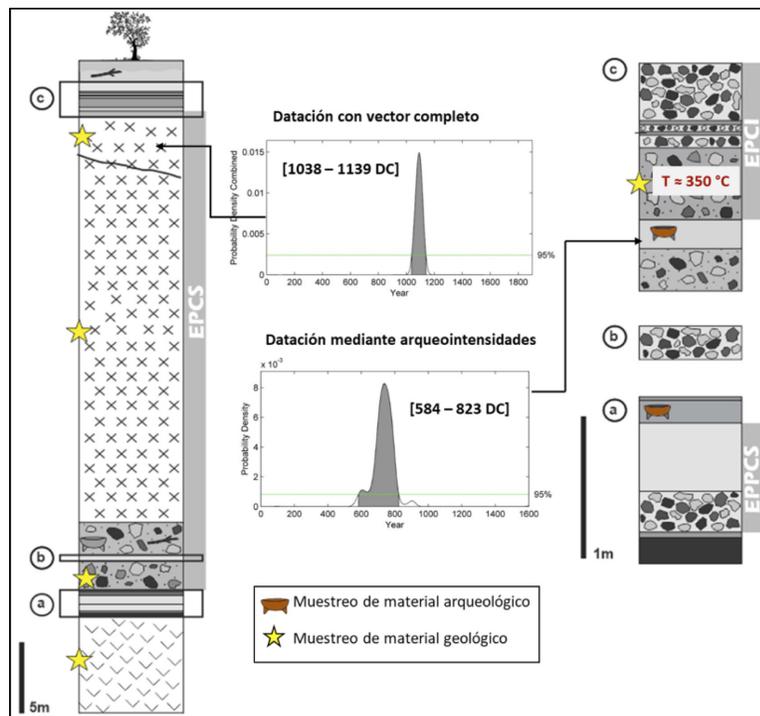


Figura 2. Resultados obtenidos en el estudio del volcán Popocatepetl. La temperatura señalada en la parte inferior izquierda corresponde a la temperatura de emplazamiento estimada para la EPCI.

cán se formó en un período corto y continuo (Chevrel *et al.*, 2016; Mahgoub *et al.*, 2016). Dataciones de ^{14}C realizadas en el paleosuelo de la base del volcán, sugieren que su actividad inició en el año ~1250 DC, temporalidad para la que se dispone del registro de diversos asentamientos humanos en la periferia, por lo que se considera que el volcán tuvo afectaciones en las sociedades Prehispánicas.

Además de la caracterización completa del vector del CMT de los materiales estudiados, los experimentos realizados permitieron determinar edades en las cerámicas intercaladas en los depósitos volcánicos y estimar temperaturas de emplazamiento de uno de los flujos piroclásticos (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2019).

b) Volcán El Metate

El Metate es un volcán Holoceno de tipo escudo, se encuentra en el estado de Michoacán y forma parte del denominado Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG). Esta conformado por 13 flujos de lava que han sido diferenciados en dos grupos por sus composiciones químicas; 4 flujos se asocian a la etapa inicial de actividad del volcán y 9 a la fase final (Figura 3). Al no existir desarrollo de paleosuelos entre los flujos de lava, estudios anteriores han considerado que su actividad volcánica es de tipo monogenética, es decir, el vol-

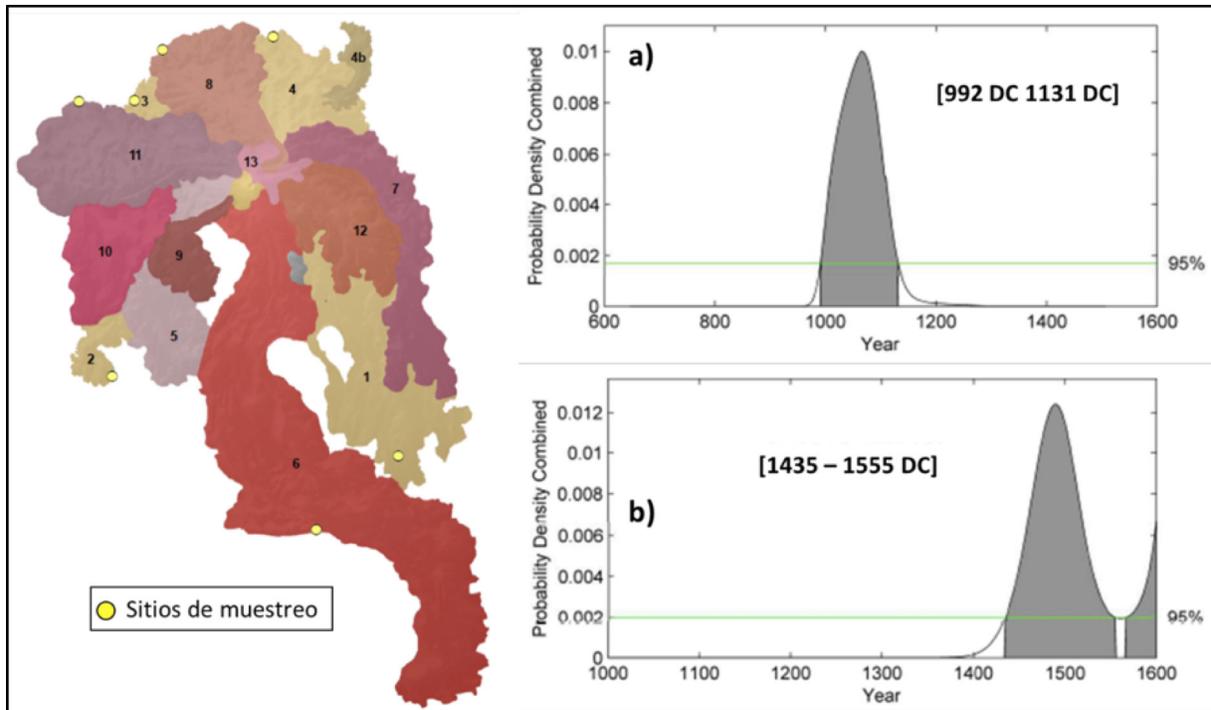


Figura 3. Representación de la distribución de los flujos de lava del volcán El Metate. a) Datación direccional de la primera fase de actividad del volcán (flujos 1 – 4). c) Datación direccional de la segunda fase de actividad del volcán (flujos 5 – 13).

En el trabajo de campo se muestrearon los 4 flujos de lava de la fase inicial del volcán y 3 de la fase final (flujos 6, 8 y 11). Se extrajeron un total de 144 núcleos paleomagnéticos. El material muestreado se caracterizó magnéticamente con la ayuda de una VFTB, se realizaron experimentos de AFD para determinación de paleodirecciones y se emplearon los métodos de TC y ME para determinación de PI.

La datación paleomagnética de los flujos de lava proporcionó una edad de entre 990 – 1130 DC para la primera fase de actividad y de 1435 – 1555 DC para la fase final. Entre ambos periodos se observa un *hiatus* de más de 200 años, con lo que se abre la discusión acerca de la naturaleza monogenética anteriormente propuesta para este volcán, la cual puede ser confirmada o descartada con un muestreo más extensivo de los flujos de lava. Adicionalmente, se puede consolidar dicha información mediante la datación de material cerámico reportado en los alrededores y sobre los flujos de El Metate.

c) Restos arqueológicos del Malpaís de Zacapu

El Malpaís de Zacapu es un conjunto de lavas Cuaternarias de composición andesítica ubicadas en la porción septentrional del Estado de Michoacán. Dataciones radiométricas (Reyes-Guzmán *et al.*, 2018) y paleomagnéticas (Mahgoub *et al.*, 2018) han determinado una fase de actividad volcánica en la región durante el Holoceno Tardío, entre ~1500 AC y ~900 DC. Por sus temporalidades, estos flujos han sido de interés no sólo dentro de la comunidad geocientífica, sino también en las investigaciones arqueológicas ya que, de acuerdo con fuentes etnohistóricas, este sitio ha sido considerado el punto de partida de la población que fundó la capital del imperio Tarasco, cultura dominante en el Occidente de México hasta la llegada de los españoles y la cual ha sido escasamente estudiada (Alcalá, 1977).

Al definir con mayor precisión los complejos cerámicos de una cultura, se tiene un mejor entendimiento de los problemas de migración y de la relación de cada complejo con otros complejos conocidos en regiones cercanas. En este trabajo se procesaron 7 fragmentos cerámicos procedentes del Malpaís “El Caracol”, flujo de lava localizado en la parte norte del Malpaís de Zacapu (Figura 4). Los fragmentos fueron caracterizados



magnéticamente mediante una VFTB y se obtuvieron PI mediante el método de TC con sus respectivas correcciones por ritmo de enfriamiento y anisotropía.

Las edades arqueomagnéticas obtenidas fueron consistentes para todos los fragmentos cerámicos.

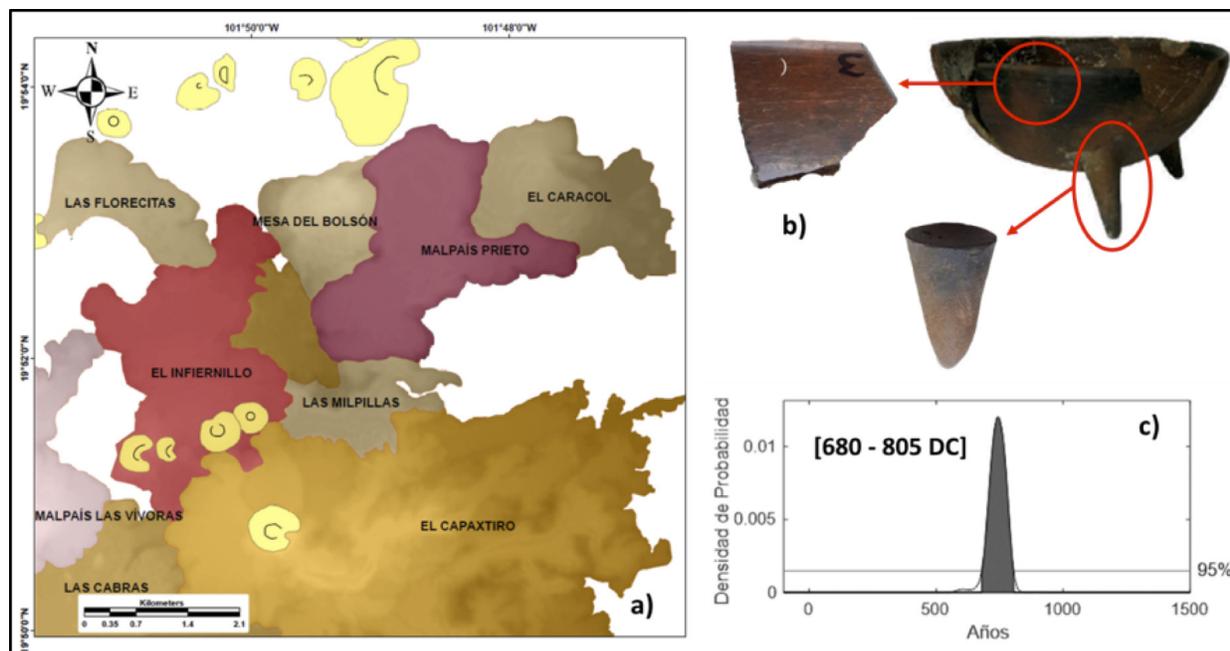


Figura 4. a) Región norte del Malpaís de Zacapu. b) Ejemplo de los fragmentos cerámicos analizados. c) Datación arqueomagnética.

4. Conclusiones

Con los ejemplos presentados se intenta destacar la versatilidad de los estudios desarrollados para el análisis de la variación del CMT en otras ramas de las ciencias. Se muestra su aplicación como una herramienta de datación útil tanto en las Geociencias como en Ciencias Antropológicas, las cuáles, se encuentran estrechamente ligadas durante el Holoceno. Por otra parte, tener una alta concentración de fechamientos en una región volcánica permite calcular con mayor precisión la tasa de nacimiento de volcanes, adicionalmente estas edades asociadas a un contexto arqueológico vislumbran procesos de migraciones poblacionales y/o cambios en las estructuras sociales. Finalmente, se mostró la utilidad de los estudios del CMT en la estimación de temperaturas de emplazamiento de flujos piroclásticos.

Referencias

- Alcalá J., 1977. La Relación de Michoacán. Colección Estudios Michoacanos V, Fimax Publicistas, Morelia, Michoacán.
- Butler R. F., 1992, Magnetic Domains to Geologic Terranes, Blackwell Scientific Publications, United Kingdom Mirror Site, 238 p.
- Chevrel M. O., Siebe C., Guilbaud M. N., Salinas S., 2016. The AD 1250 E Metate shield volcano (Michoacán): Mexico's most voluminous Holocene eruption and its significance for archaeology and hazards. *The Holocene* 26, 3, 471 – 488.
- Dunlop D. J., 2011. Physical basis of the Thellier-Thellier and related paleointensity methods. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 187, 118 – 138.



- Halhedahl S., Day R., Fuller M., 1980. The effect of cooling rate on the intensity of weak-field TRM in single – domain magnetite. *J. Geophys. Res.* 85, B7, 3690 – 3698.
- Mahgoub A-N., Reyes Guzmán N., Böhnell H., Siebe C., Pereira G. and Dorison A., 2018. Paleomagnetic constrains on the ages of the Holocene Malpaís de Zacapu lava Flow eruptions, Michoacán (Mexico): implications for archeology and volcanic hazards. *The Holocene* 28, 2, 229 – 245.
- Mahgoub A. N., Böhnell H., Siebe C., Chevrel M. O., 2017. Paleomagnetic study of El Metate shield volcano (Michoacán, México) confirms its monogenetic nature and young age (~1250 CE). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 336, 209-218.
- Pérez-Rodríguez N., Morales J., Goguitchaichvili A., García-Tenorio F., 2019. A comprehensive paleomagnetic study from the last Plinian eruptions of Popocatepetl volcano: absolute chronology of lavas and estimation of emplacement temperatures of PDCs. *Earth Planet and Space* 71, 80, 26 p.
- Reyes-Guzmán N., Siebe C., Chevrel M. O., Guilbaud M-N., Salinas S. and Layer P., 2018. Geology and radiometric dating of Quaternary monogenetic volcanism in the western Zacapu lacustrine basin (Michoacán, México): implications for archeology and future hazard evaluations. *Bulletin of Volcanology* 80, 18, 20 p.
- Riisager P y Riisager J., 2001. Detecting multidomain magnetic grains in Thellier paleointensity experiments. *Phys. Earth Planet. Inter.* 125, 111 – 117.
- Siebe C., Macías J.L., Abrams M., Obenholzner J., 1996. Repeated volcanic disaster in Prehispanic time at Popocatépetl, central México: past key to the future? *Geology* 24, 5, 399 – 402
- Thellier E., y Thellier O., 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Geophys.* 15, 285 – 376.
- Veitch R. J., Hedley I. G., Wagner J. J., 1984. An investigation of the intensity of the geomagnetic field during Roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles. *Archaeological Science Genève* 37, 3, 359 – 373.