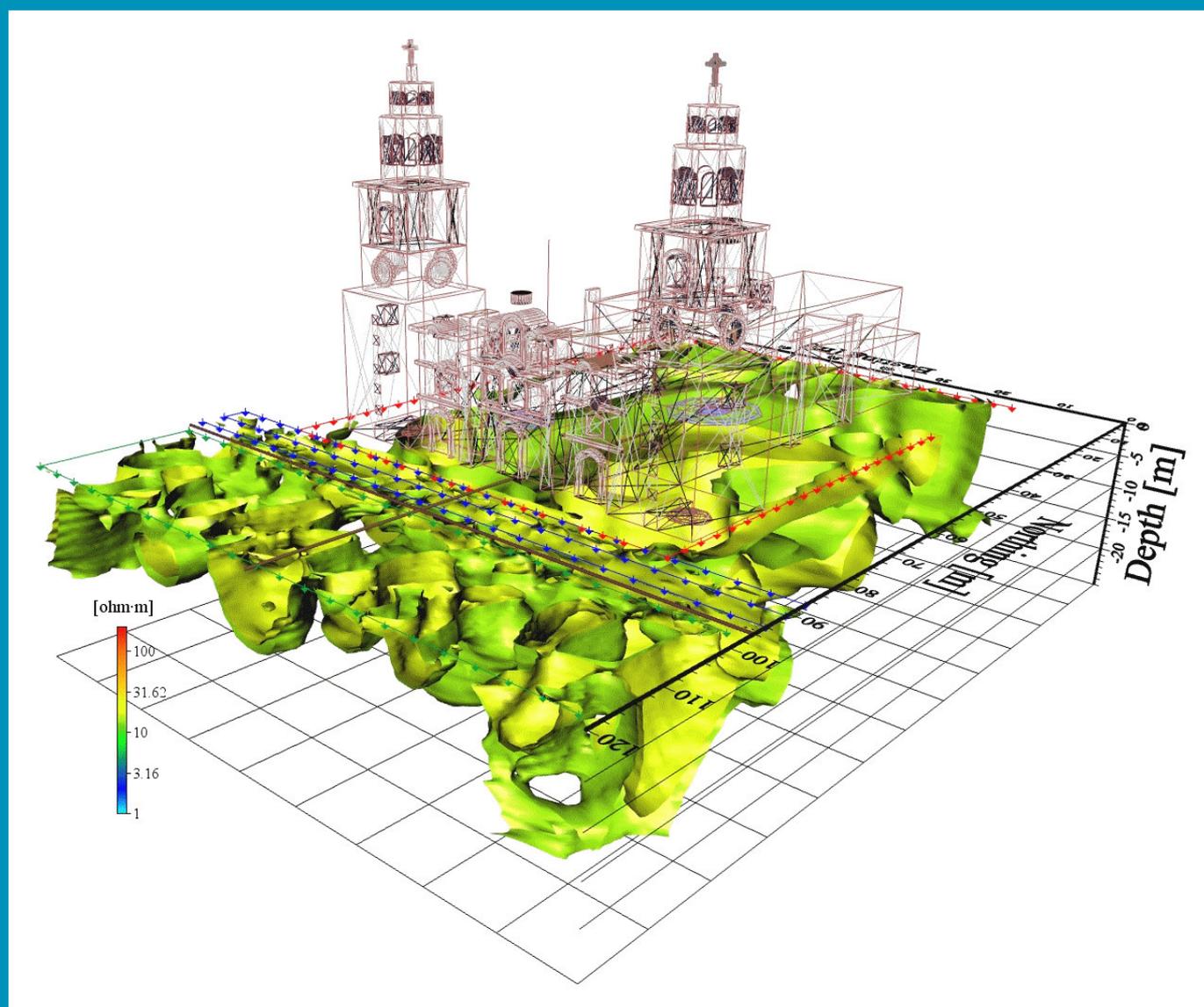


# AVANCES EN ARQUEOMAGNETISMO Y GEOFÍSICA APLICADA I

Avto Goguitchaichvili, ed.



## AVANCES EN ARQUEOMAGNETISMO Y GEOFÍSICA APLICADA I

Sobre la edad de los hornos de cal en el área maya (pág. 3)

Nuevas evidencias sobre la edad de abandono del sitio arqueológico Plazuelas (Guanajuato, México) mediante la datación arqueomagnética de un piso quemado (pág. 10)

Evidencia de escorias de cobre prehispánicas en el área de Santa Clara del Cobre, Michoacán, Occidente de México (pág. 16)

Primer intento de datación de pinturas murales mesoamericanas (pág. 22)

Datación de tinajas arqueológicas del sitio Guachimontones, Occidente de Mesoamérica (pág. 28)

Dataciones arqueomagnéticas en la ciudadela de Teotihuacan, Sierra de las Navajas y Xalasco (pág. 34)

Revaluación de la cronología de erupciones del volcán Vesubio (Italia) a partir de 79 A. D. (pág. 40)

Archaeomagnetic Dating of the Eruption of Xitle Volcano, Basin of Mexico: Implications for the Mesoamerican Centers of Cuicuilco and Teotihuacan (pág. 47)

Primeros resultados de arqueointensidades de Colombia: sitios prehispánicos en el valle del río Magdalena (Honda-Tolima y Puerto Bogotá-Cundinamarca) (pág. 54)

Guachimontones de Teuchitlán: un estudio arqueomagnético para mejorar la cronología del Occidente de México (pág. 62)

Coercivity and Vector Magnetization Analysis of Obsidian Samples from the Trans-Mexican Volcanic Belt (pág. 70)

Aportes a la cronología absoluta de la estancia jesuítica de Alta Gracia (Córdoba, Argentina): estudio arqueomagnético de la baldosa de la parroquia Nuestra Señora de la Merced (pág. 76)

Intervención arqueomagnética del horno de la hacienda San Pedro Cholul (Mérida, Yucatán) (pág. 84)

Tomografía de resistividad eléctrica 3D en la Catedral de Morelia, México (pág. 91)

Archaeomagnetic Study of the Edificio de las Columnas Complex, El Tajin, Mesoamerica (pág. 98)

## ADVANCES IN ARCHAEOLOGY 4 • ISSN 2254–187X

Open Access Monograph Series. <http://laiesken.net/advances/>.

Edited & Published by Pascual Izquierdo-Egea. Graus, Spain.

© De esta edición, Pascual Izquierdo Egea, 2018. Licencia CC BY 3.0 ES.

Cover photo: Cifuentes-Nava *et al.* (2017), *Arqueol. Iberoam.* 36: 29-35.

Mail: <http://laiesken.net/advances/contact/>. Printed in Spain.

## ARQUEOLOGÍA MEXICANA

# SOBRE LA EDAD DE LOS HORNOS DE CAL EN EL ÁREA MAYA

*About the age of the lime kilns in the Maya area*

Soledad Ortiz Ruiz,\* Avto Goguitchaichvili\*\* y Juan Morales\*\*

\* Instituto de Investigaciones Filológicas, UNAM, México; \*\* SAN, Instituto de Geofísica, UNAM, México

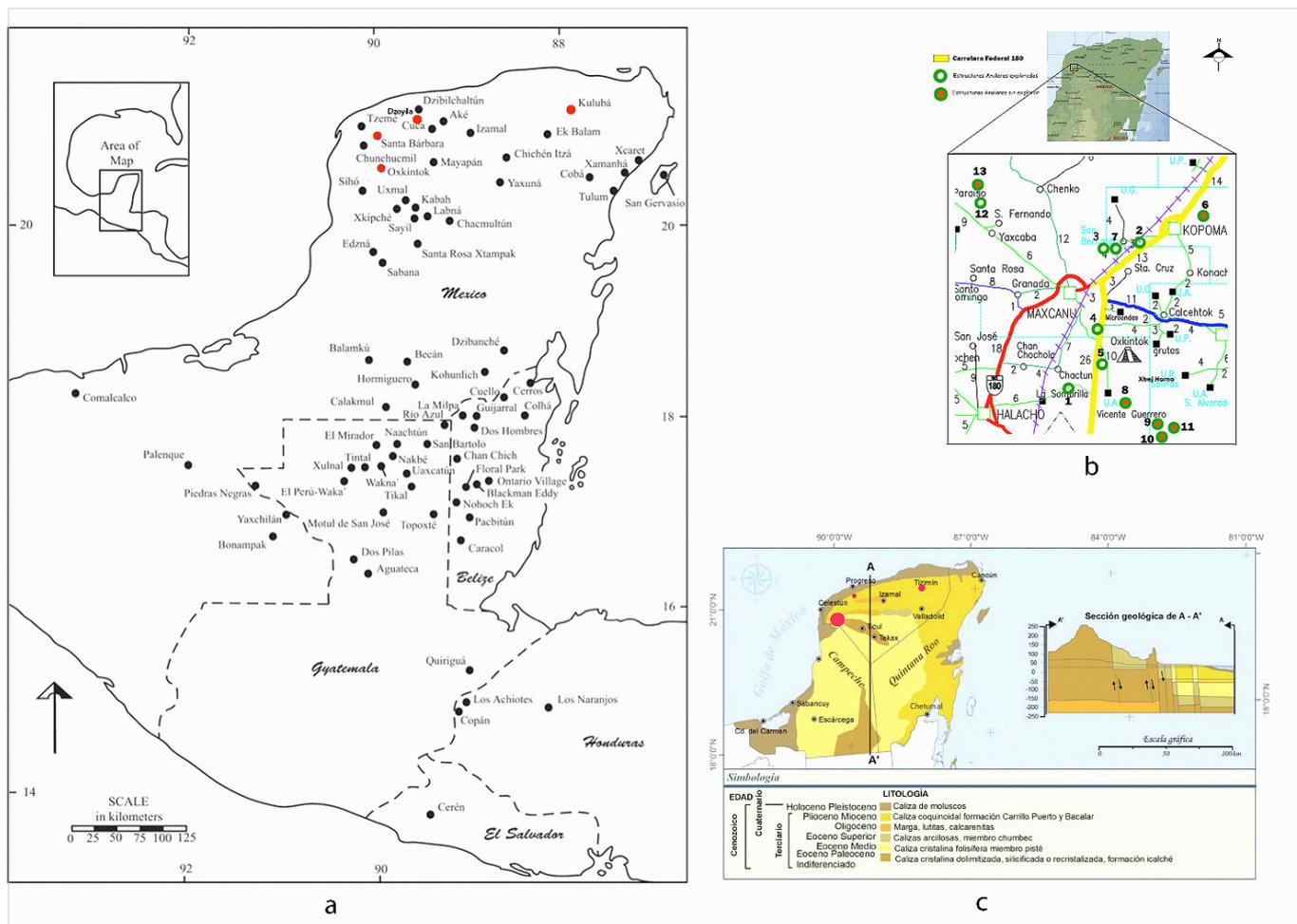


Figura 1. Área maya: a) ubicación de la zona de investigación resaltada en rojo (modificado de Stanton y Magnoni 2008: 3), b) mapa del trazo carretero del Salvamento y los hornos de cal excavados y no explorados (modificado de Uc y Morales 2013), c) mapa geológico de la península de Yucatán (modificado de García Gil y Graniel Castro 2010: 5).

**RESUMEN.** La investigación que presentamos es sobre el hallazgo y la datación arqueomagnética de hornos de cal en el área maya, México. La relevancia de la datación arqueomagnética consiste en localizar las construcciones arquitectónicas y dilucidar

el periodo de utilización por las sociedades que habitaron la zona de ubicación de dichas construcciones. Asumimos que se trataba de hornos prehispánicos por su asociación con el contexto de la excavación. Sin embargo, los resultados de la com-

Recibido: 3-IX-2015. Aceptado: 8-IX-2015. Publicado: 2-X-2015. <http://purl.org/aia/282>.

binación de dataciones y métodos arqueométricos permitieron ubicar estas estructuras en distintos periodos de utilización y, por tanto, asumir la continuidad de esta tecnología productiva más allá del periodo prehispánico. Asimismo los trabajos de datación nos permiten clarificar la utilización de esta tecnología y práctica productiva en dicha zona cultural.

**PALABRAS CLAVE:** hornos de cal, cal, arqueomagnetismo, área maya.

**ABSTRACT.** *The investigation presented here is related to the discovery and archaeomagnetic dating of lime kilns in the Maya area, Mexico. The relevance of such dating is to locate architectural constructions and elucidate the period of use by societies that are responsible for their construction. We assume a prehispanic period for the kilns because of their context within the excavation. The combination of dating methods and archaeometric experiments allowed the identification of different periods of use and, therefore, suggests the persistence of this production technology beyond the prehispanic period. Dating work also allows us to clarify the use of this technology and productive practices in this cultural area.*

**KEYWORDS:** Lime kilns, Lime, Archaeomagnetism, Mayan area.

## ANTECEDENTES

La excavación de las estructuras anulares descubiertas durante los trabajos de salvamento en el área maya (fig. 1) proporcionó materiales derivados de la producción de cal, es decir, restos de piedras calcinadas, concreciones de cal, cenizas y microrestos de carbón y paredes con evidencia de calcinación; debido a tales evidencias, decidimos denominarlas «hornos de cal». Dichas estructuras consistían formalmente en una oquedad excavada en la roca madre, las cuales ocasionalmente presentan en su interior un muro de piedra que recubre la pared de la oquedad. Como remate de la misma, en la parte superior, sobre el terreno natural, presentan dos alineamientos contruidos en piedra, los cuales acusan una forma anular a manera de banqueta en torno a la boca de la oquedad. La oquedad se encuentra rellena de distintas capas de sedimentos y derrumbes (fig. 2) (Ortiz Ruiz 2014).

La importancia del hallazgo de contextos pirotécnicos dedicados a la producción de cal radica en la ubicación de un dato elusivo a lo largo de la historia de la investigación sobre la tecnología de producción de cal en el área maya. Aunada a la escasez de datos arqueológicos y a la riqueza de los contextos hallados, se decidió realizar análisis arqueométricos que confirmaran y validaran nuestras interpretaciones arqueológicas.

Los antecedentes de la investigación de estructuras utilizadas para la producción de cal se remiten a estudios etnográficos realizados por Morris *et al.* (1931), quienes registran la quema de cal por medio de una pira construida en el sitio de Chichén Itzá durante los trabajos de excavación de la *Carnegie Institution*. Otras referencias las anotan Redfield y Villa Rojas (1962) durante sus investigaciones en Cham Kom, donde registran la producción de cal en zonas periféricas del pueblo, ubicándose las piras en zonas de extracción de la materia prima. Sin embargo, la investigación dedicada plenamente a este tema la realizó Schreiner (2002) con su trabajo titulado *Traditional Maya Lime Production: Environmental and Cultural Implications of a Native American Technology*, el cual se ha convertido en la referencia obligada sobre el tema. Sin embargo, en su investigación considera que el método tradicional fue el de las piras y registra los hornos de cal en las décadas de 1940-1950. Asimismo menciona en el registro la presencia de algunos casos de hornos arqueológicos, sin evidencia clara de estar relacionados con la producción de cal. No obstante, la gran mayoría de las publicaciones sobre el tema está basada en los productos terminados, como es el caso de los morteros, estucos, aplanados, etc., y algunas pocas evidencias —específicamente cuatro— sobre hornos de cal (Barba 2013; Hansen 2000; Villaseñor 2010).

Los casos concretos sobre la presencia de hornos en contextos arqueológicos son ubicados a lo largo del área maya: el primero, para el sitio de Copán, publicado por Abrams y Freter (1996); el segundo, publicado por Fauvet-Barthelot (1986), en el sitio de Cauinal; un tercero, hallado en el sitio de La Aguada, en Cozumel (Freidel y Sabloff 1984); y, por último, el sitio de *Pulltrouser Swamp* (Ettlinger 1983, citado en Barba y Villaseñor 2012). Además de los hornos y las piras, se han registrado otros sistemas no claros de producción de cal como los descritos por Mazzullo y Graham (1994: 786) en el sitio de Santa Cruz, Belice, y por Mackinnon y May (1990: 198-199) para el sitio de Laguna Placencia en Beli-

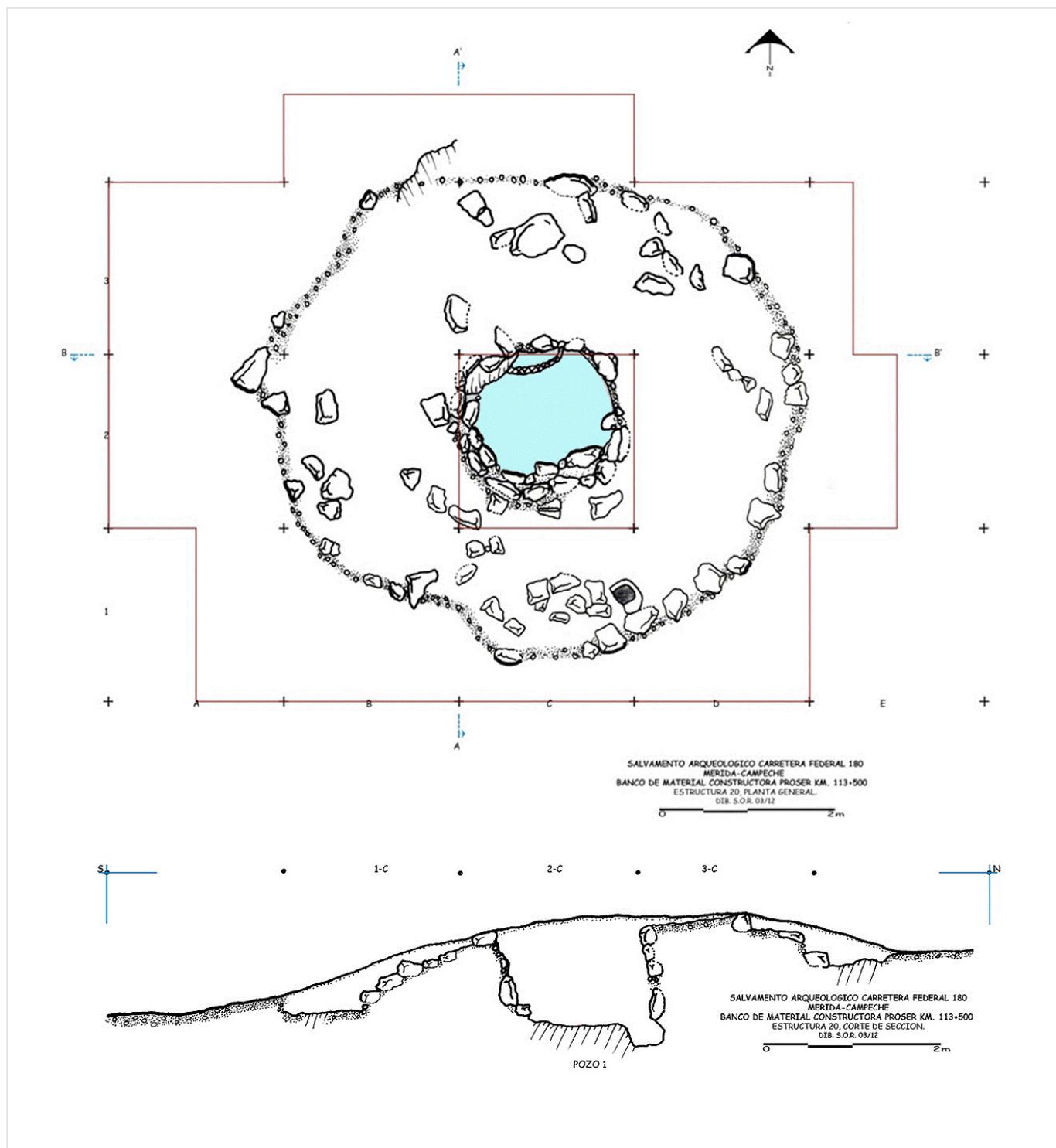


Figura 2. Esquema de un horno de cal. Lo resaltado en color turquesa corresponde a la oquedad (modificado de Ortiz Ruiz 2014: 55).

ce; este último evidencia producción de cal a partir de conchas marinas utilizando artefactos cerámicos.

En el área maya —principalmente la zona de las planicies del norte de Yucatán— el método de datación más común es la tipología cerámica. En este contexto, sin embargo, resulta inviable por su poca presencia en el mismo. Por otra parte, la escasez

de contextos arqueológicos y de datos concretos de comparación motivaron la aplicación de diferentes técnicas arqueométricas, incluyendo la utilizada en este trabajo: la datación arqueomagnética. Mediante el arqueomagnetismo es posible obtener información sobre el último evento de calentamiento a alta temperatura de un material por medio del análisis

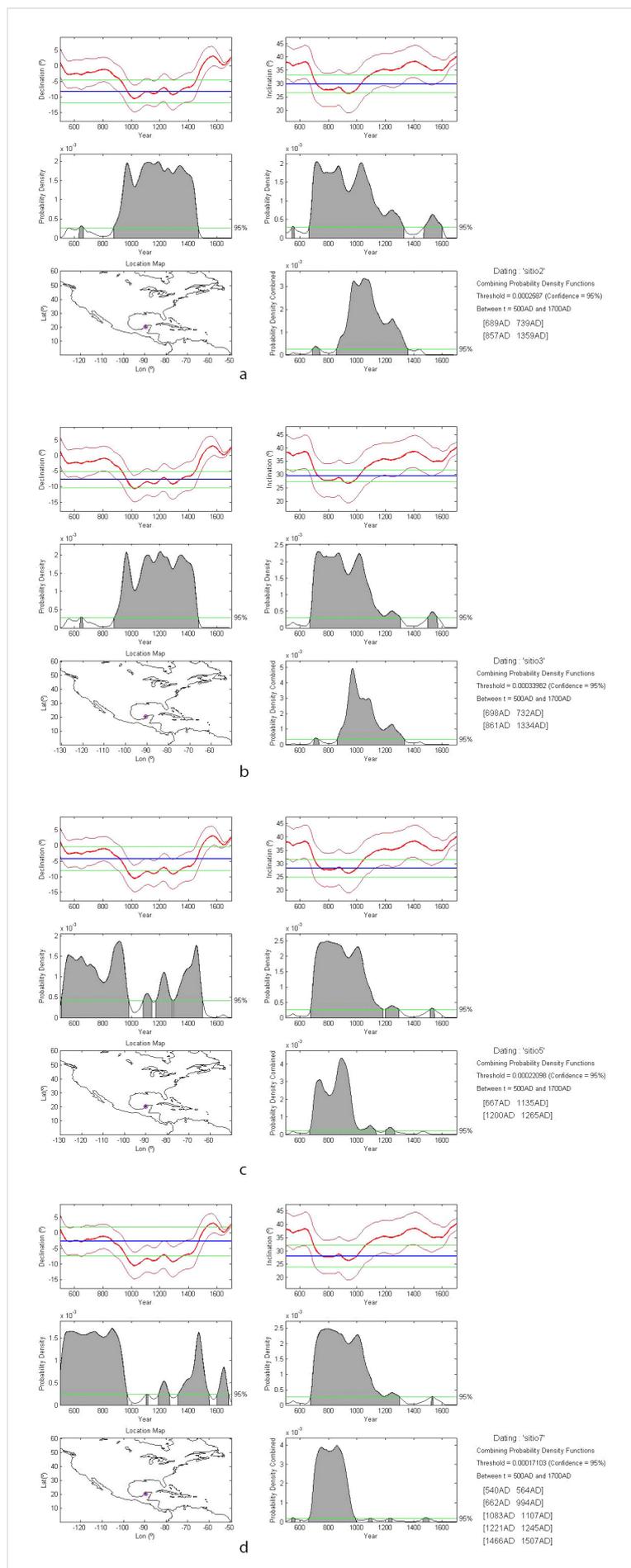


Figura 3. Resultados de la datación arqueomagnética para el grupo temporal del Clásico Terminal: a) estructura H8, b) estructura H12, c) estructura H1, d) estructura H3.

del registro magnético adquirido por dicho material durante tal evento (Goguitchaichvili 2014). Para complementar esta datación, se realizó una tipología cerámica de los escasos restos obtenidos en la excavación de estos contextos.

El objetivo primario de esta investigación fue realizar la datación de un contexto pirotecnológico de materiales kársticos e iniciar un programa de dataciones que enriquezcan la curva de datación que está siendo creada para Mesoamérica.

## RESULTADOS

Para lograr nuestro objetivo, realizamos una temporada de campo en octubre de 2013, donde recuperamos las muestras de ocho estructuras identificadas con las siguientes claves: H1, H2, H3, H5, H7, H8, H12 y H14; teniendo un total de 93 muestras viables de análisis. Además, como un método de control, la estructura H14 pertenece a investigaciones llevadas a cabo dentro de la ciudad de Mérida, en el sitio de Dzoyilá. Otro punto importante que se manejó para verificar la función de estas estructuras fue la recuperación de muestras en contextos no explorados, pero que sufrieron pozos de saqueo. Este es el caso de la estructura denominada H8.

Los análisis de las muestras fueron llevadas a cabo en las instalaciones del *Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN)*, ubicadas en el Campus Morelia del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al tratarse de un material *in situ*, en el lugar de la cocción, se utilizó el método *arqueodireccional*. Este método implica determinar la inclinación y declinación magnética de la magnetización remanente grabada en el material del horno durante su último uso, así como su posterior comparación con la curva arqueomagnética de referencia disponible para Mesoamérica.

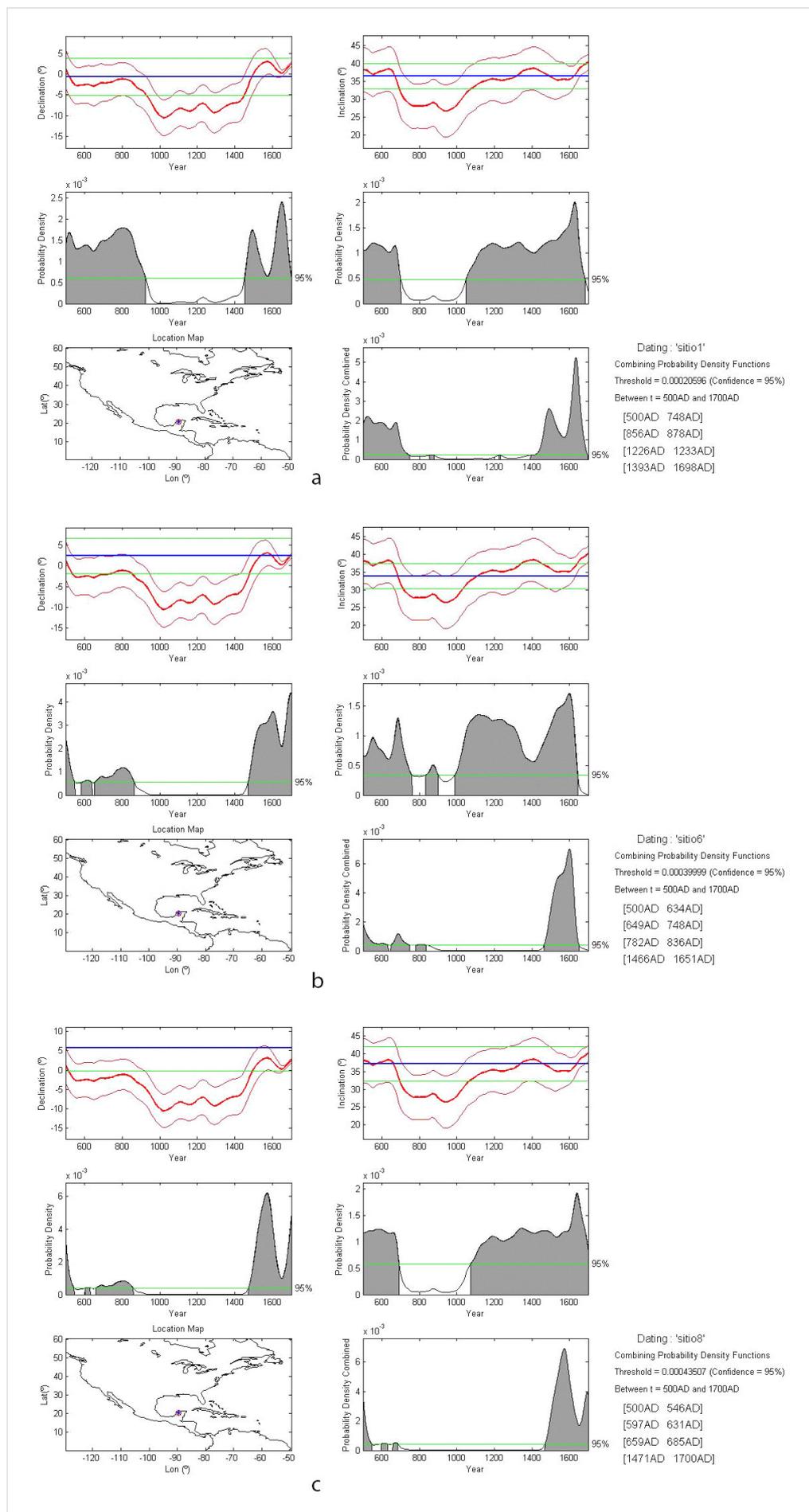


Figura 4. Resultados de la datación arqueomagnética para el grupo temporal del periodo colonial: a) estructura H14, b) estructura H2, c) estructura H7. Según la plataforma de datación arqueomagnética de Pavón-Carrasco *et al.* (2011).

A partir de los resultados obtenidos del análisis de las muestras se determinó:

1. La estructura H5 no presenta evidencia del fuego; en este caso, cabe aclarar que las muestras fueron tomadas en las piedras del muro superior de la estructura alrededor de la oquedad, lo cual es concluyente con algunas propuestas de funcionamiento que indican que la parte superior de los hornos no recibía directamente el fuego.

2. En el caso de la estructura H8, las muestras recolectadas nos aportan fechas de la última quema y proporcionan una comprobación parcial sobre nuestra hipótesis de la función de las estructuras como hornos, posiblemente para cal, pero nos falta concluir la excavación formal de dicha estructura.

3. En la estructura H14, cuyo contexto estaba enclavado en un complejo doméstico, que al parecer era ajeno al mismo, se obtuvieron evidencias de dataciones que permitieron corroborar la secuencia constructiva y habitacional de dicho complejo.

4. El resto de las estructuras presentan dataciones válidas para los periodos de ocupación de la zona de investigación, sin embargo también proporcionan y abren la discusión de los cambios y pervivencias tecnológicas después de la conquista española; dado que las temporalidades obtenidas corresponden al periodo clásico (entre el 900-1000 d. C.) (fig. 3) y la época colonial (hacia el 1600 d. C.) (fig. 4). Estos resultados permiten ligar la producción de cal como una actividad vigente a lo largo de los siglos y con una estructura idéntica y patrones de distribución similares en los asentamientos del área maya.

## CONCLUSIONES

El empleo de las dataciones arqueomagnéticas permitió refinar la información proporcionada por los materiales cerámicos recolectados durante las excavaciones. Asimismo proporcionó información sobre la función de los contextos al poder aplicar la técnica, asumiendo que las temperaturas alcanzadas en dichas estructuras fueron mayores de 600 °C; lo cual permite sugerir que efectivamente la función de dichas estructuras fue la de hornos para producir cal.

La identificación de distintas temporalidades permite enfocarnos en el estudio tecnológico con vistas a entender el funcionamiento de dichas estructuras en el área maya, así como su eliminación en el periodo histórico con el cambio de modo de producción; debido posiblemente a la introducción de

nuevas tecnologías y productos como los ladrillos en la época del henequén, aspecto que necesita más investigación. El hallazgo de otros hornos en distintas zonas de la península de Yucatán ha permitido realizar nuevos muestreos y dataciones, tanto de las estructuras cuanto de restos cerámicos de los sitios en donde se ubican los hornos.

## Agradecimientos

Los autores dan las gracias al Instituto Nacional de Antropología e Historia, en especial al Centro INAH-Yucatán, y al Instituto de Geofísica, Campus Morelia, por las facilidades otorgadas para llevar a cabo esta investigación. AG agradece el apoyo financiero del proyecto UNAM-PAPPIT IN 105214.

## Sobre los autores

*M.<sup>a</sup> SOLEDAD ORTIZ RUIZ (sole.ortiz.ruiz@gmail.com) es Licenciada en Arqueología (2009) por la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), Maestra en Arqueología (2014) por El Colegio de Michoacán A. C. (COLMICH) y, actualmente, estudiante del Doctorado en Estudios Mesoamericanos por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). A lo largo de sus estudios de maestría, se especializó en la tecnología de la producción de cal y estudios arqueométricos de la roca caliza, aspectos sobre los cuales continúa trabajando en sus estudios de doctorado.*

*AVTO GOGUITCHAICHVILI (avto@geofisica.unam.mx) es Licenciado en Física por la Universidad Estatal de Tbilisi (República de Georgia), Maestro y Doctor en Geofísica con especialidad de geomagnetismo por la Universidad de Montpellier, Francia. Actualmente, es investigador titular del Instituto de Geofísica de la UNAM y corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional <<http://www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/>>.*

*JUAN MORALES (jmorales@geofisica.unam.mx) es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus líneas de investigación se destaca el arqueomagnetismo, con contribuciones importantes tanto en Mesoamérica como en otras partes del mundo. Actualmente, es responsable del Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural en el Campus Morelia de la UNAM y corresponsable del Servicio Arqueomagnético Nacional.*

## REFERENCIAS

- ABRAMS, E. M., A. C. FRETER. 1996. A Late Classic Lime-plaster Kiln from the Maya Centre of Copan. Honduras. *Antiquity* 70: 422-428.
- BARBA PINGARRÓN, L. A. 2013. El uso de la cal en el mundo prehispánico mesoamericano. En *La cal: historia, propiedades y usos*, editado por L. Barba Pingarrón e I. Villaseñor Alonso, pp. 21-47. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas, Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A. C.
- FAUVET-BERTHELOT, M. F. 1986. *Ethno-préhistoire de la maison Maya*. México: Centre d'études mexicaines et centraméricaines.
- FREIDEL, D., J. SABLOFF. 1984. *Cozumel. Late Maya Settlement Patterns*. Orlando: Academic Press.
- GARCÍA GIL, G., E. GRANIEL CASTRO. 2010. Geología. En *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*, editado por R. Duran García y M. Méndez González, pp. 4-6. Mérida, Yucatán: CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma.
- GOGUITCHAICHVILI, A. 2014. *Arqueomagnetismo*. Informe técnico entregado al Centro INAH-Yucatán.
- HANSEN, E. F. 2000. *Ancient Maya Burnt-lime Technology: Cultural Implications of Technological Styles*. Ph.D. Dissertation. Los Angeles: University of California.
- MACKINNON, J., E. MAY. 1990. Small-scale Maya Lime Making in Belize: Ancient and Modern. *Ancient Mesoamerica* 1: 197-203.
- MAGALONI KERPEL, D. 2001. Materiales y técnicas de la pintura mural maya. En *La pintura mural prehispánica en México II. Área maya. Tomos III y IV. Estudios*, coordinado por B. de la Fuente y L. Staines Cicero, pp. 155-198. México, D. F.: Instituto de Investigaciones Estéticas, Universidad Nacional Autónoma de México.
- MAZULLO, S. J., C. S. TEAL, E. GRAHAM. 1994. Mineralogic and Crystallographic Evidence of Lime Processing, Santa Cruz Maya Site (Classic to Postclassic), Ambergris Caye, Belize. *Journal of Archaeological Science* 21: 785-795.
- MORRIS, E. H., J. CHARLOT, A. A. MORRIS. 1931. *The Temple of the Warriors at Chichen Itzá, Yucatan*. Washington D. C.: Carnegie Institution of Washington.
- ORTIZ RUIZ, M. S. 2014. *Caracterización de las estructuras anulares de la región del occidente de las tierras bajas mayas*. Tesis de Maestría. La Piedad, Michoacán: El Colegio de Michoacán A. C.
- PAVÓN-CARRASCO, F. J., J. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M. L. OSETE, J. M. TORTA. 2011. A matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science* 38: 408-419.
- REDFIELD, R., A. VILLA ROJAS. 1962. *Chan Kom. A Maya Village*. Chicago: The University of Chicago Press.
- SCHREINER, T. 2002. *Traditional Maya Lime Production: Environmental and Cultural Implications of a Native American Technology*. Ph.D. Dissertation. Berkeley: University of California.
- STANTON, T., A. MAGNONI. 2008. Places of Remembrance: The Use and Perception of Abandoned Structures in the Maya Lowlands. En *Ruins of the Past: The Use and Perception of Abandoned Structures in the Maya Lowlands*, editado por T. Stanton y A. Magnoni, pp. 1-24. Boulder, Colorado: University Press of Colorado.
- UC GONZÁLEZ, E., R. MORALES UH. 2013. Distribución de los hornos de cocción y su relación con sitios del surponiente del estado de Yucatán, en *IX Congreso Internacional de Mayistas: los mayas en el contexto de las culturas americanas* (Campeche, México, 23-29 de junio).
- VILLASEÑOR ALONSO, I. 2010. *Building Materials of the Ancient Maya. A Study of Archaeological Plasters*. Saarbrücken: Lambert.
- VILLASEÑOR ALONSO, I., L. BARBA PINGARRÓN. — 2012. Los orígenes tecnológicos de la cal. *Cuicuilco* 19/55: 11-41.
- 2011. El estudio de materiales constructivos en la arqueología mesoamericana. *Anales de Antropología* 45: 79-98.
- VILLASEÑOR ALONSO, I., E. GRAHAM. 2010. The use of volcanic material for the manufacture of pozzolanic plasters in the Maya lowlands: a preliminary report. *Journal of Archaeological Science* 37: 1339-1347.

## AVANCE DE INVESTIGACIÓN

# NUEVAS EVIDENCIAS SOBRE LA EDAD DE ABANDONO DEL SITIO ARQUEOLÓGICO PLAZUELAS (GUANAJUATO, MÉXICO) MEDIANTE LA DATACIÓN ARQUEOMAGNÉTICA DE UN PISO QUEMADO

## *New Evidence of the Date of Abandonment of the Plazuelas Archaeological Site in Guanajuato, Mexico through Archaeomagnetic Dating of a Burned Floor*

*Juan Morales,\* Carlos Castañeda,\*\* Efraín Cárdenas\*\*\*  
y Avto Goguitchaichvili\**

\* SAN, Instituto de Geofísica, UNAM, México; \*\* Centro INAH, Guanajuato, México; \*\*\* El Colegio de Michoacán, México

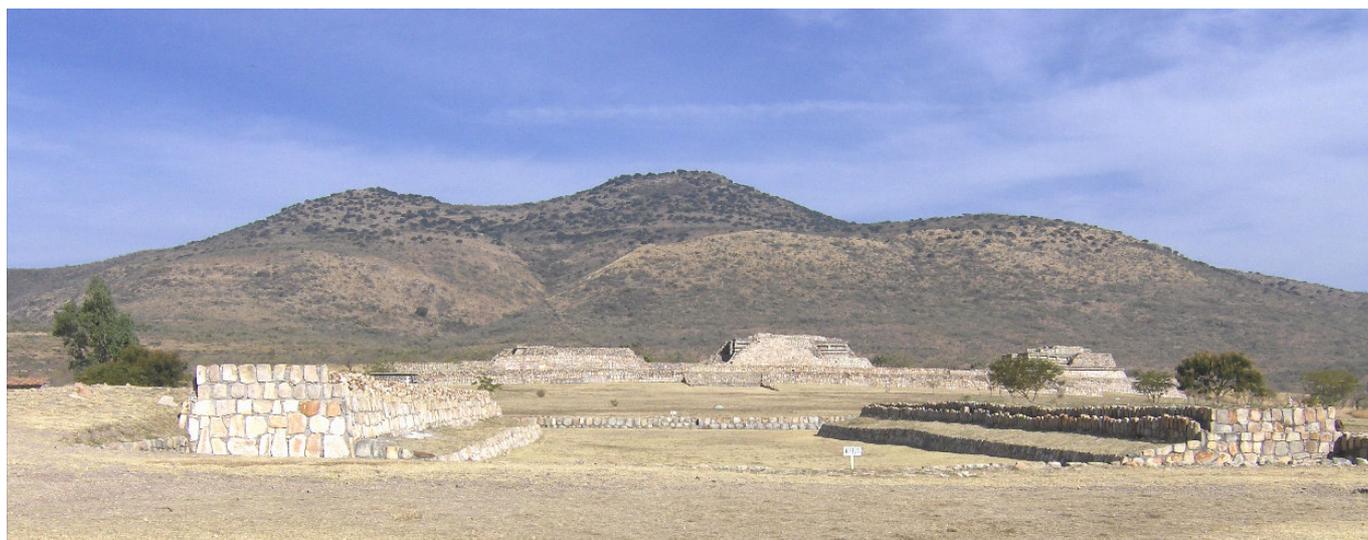


Figura 1. Vista panorámica del sitio arqueológico Plazuelas, Pénjamo, Gto. Obsérvese la Sierra de Pénjamo al fondo, cuya morfología se cree quisieron representar con la distribución de los edificios de cantera. Al centro se observa el juego de pelota.

**RESUMEN.** Se presentan los resultados de la datación arqueomagnética de un piso quemado del sitio arqueológico Plazuelas, Guanajuato. La carencia de una datación para la edad de abandono del sitio, detallada en relatos etnohistóricos, así como de carbón asociado a esta etapa, motivó la aplicación de un método alternativo de datación, independiente de los métodos tradicionales. La edad obtenida en este estudio, como la más probable para la última exposición al fuego del piso analizado, es bastante congruente con las evidencias arqueológicas disponibles para el sitio Plazuelas.

Difícilmente una exposición posterior al fuego (ya sea de origen natural o provocada por el hombre) daría como resultado una combinación de valores para los tres parámetros magnéticos determinados que convergieran en el intervalo de edad estimado para el abandono del sitio en cuestión.

**PALABRAS CLAVE:** pisos quemados, datación arqueomagnética, sitio arqueológico Plazuelas, Guanajuato, México.

Recibido: 13-X-2015. Aceptado: 16-X-2015. Publicado: 22-X-2015. <http://purl.org/aia/286>.



Figura 2. Mapa de localización del municipio de Pénjamo en el estado de Guanajuato.

**ABSTRACT.** *The results of the archaeomagnetic dating of a burned floor from the archaeological site Plazuelas, Guanajuato, Mexico, are presented. The lack of an absolute date for the age of abandonment of the site, which is detailed in ethnohistorical accounts, as well as the lack of carbon remains conclusively associated with this stage, led to the implementation of an alternative method. The age obtained in this study, most likely representing the floor's last exposure to fire, is quite consistent with the available archaeological evidence for the site's date of abandonment. A subsequent exposure to fire (either natural or anthropogenic) would not likely yield a combination of three magnetic parameters that would converge around the estimated period of abandonment of the site under study.*

**KEYWORDS:** *Burned floors, Archaeomagnetic dating, Plazuelas archaeological site, Guanajuato, Mexico.*

## ANTECEDENTES

Plazuelas, zona arqueológica concebida como un espacio abierto y en relación directa con los cerros (Castañeda 2010), está constituida por diversos edificios de cantera tomada de la cañada donde se encuentra: una plaza de juego de pelota, un temazcal y jardines hundidos por los que se comunican sus edificaciones (fig. 1). Es un yacimiento arqueológico ubicado en la comunidad de San Juan el Alto Plazuelas, a pocos kilómetros al oeste de la ciudad de Pénjamo, Gto., en una de las estribaciones de la Sierra de Pénjamo, ocupando un área de 34 ha (fig. 2).

Existen al parecer dos zonas principales en las cuales se han descubierto petroglifos: una al este del juego de pelota, en las cercanías del temazcal, y otra sección, más importante, al norte. Los petroglifos fueron grabados por los nativos sobre la superficie de los afloramientos de roca ígnea, en alto

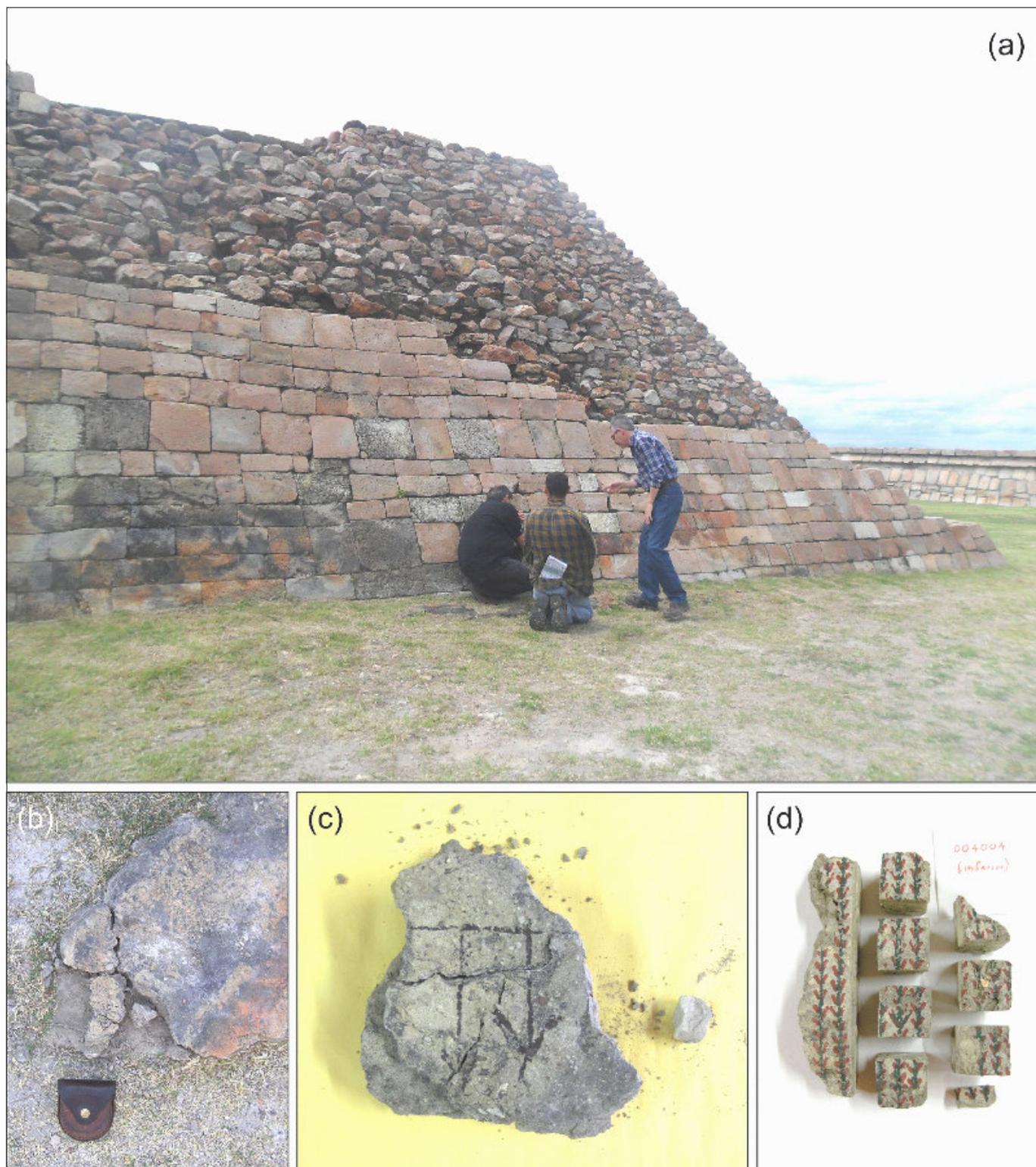


Figura 3. a) Vista de la estructura este del conjunto arquitectónico. Sobre varios de sus muros, y sobre el piso bajo estos (b), se observan evidencias de fuego. El piso es un aplanado de arcilla y cal que en algunos sectores presenta un estado de conservación bastante bueno. Nótese la marca de orientación con alineamiento N-S trazada sobre el fragmento a tomar. c) Acercamiento del fragmento objeto de estudio, previo a su tratamiento en el laboratorio. d) Vista del fragmento ya marcado sobre su superficie y parcialmente seccionado en especímenes cúbicos.

y bajo relieve: agujeros, círculos, líneas punteadas, líneas continuas, espirales, círculos concéntricos, figuras zoomorfas. Uno de tales petrograbados se asemeja bastante fielmente a la distribución del si-

tio (Castañeda 2010). El yacimiento muestra evidencias arqueológicas de ocupación del periodo clásico, entre los años 600 y 900 de nuestra era. Los habitantes de Plazuelas provenían de diferentes

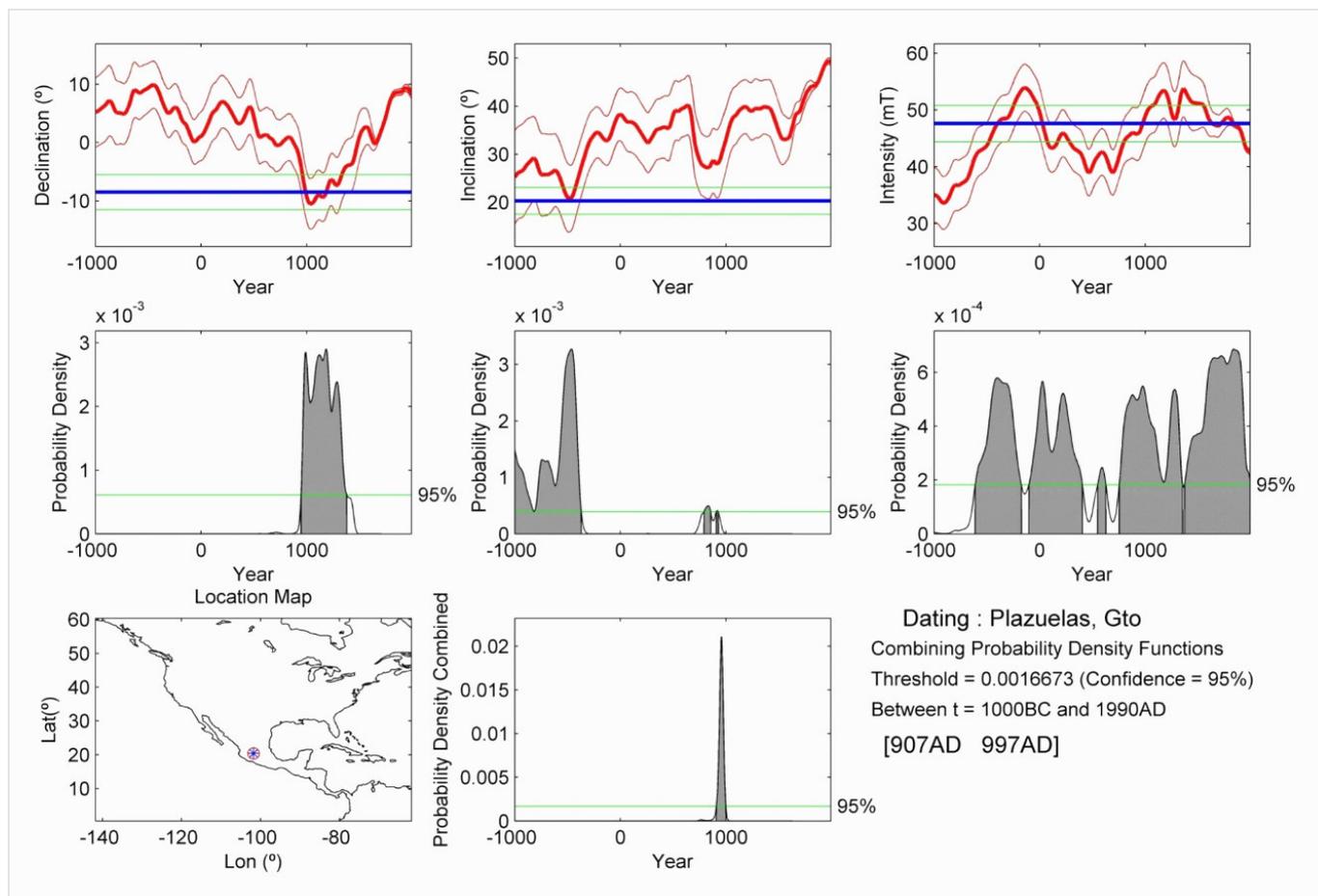


Figura 4. Gráficos resultantes del proceso de datación arqueomagnética del fragmento de piso quemado. En la fila superior se muestran las curvas de referencia de variación secular para la declinación, inclinación e intensidad magnética, respectivamente. La intersección de los parámetros magnéticos obtenidos en el laboratorio (Dec, Inc e Int) con las respectivas curvas de referencia establecen, mediante determinaciones estadísticas bayesianas, los intervalos de máxima probabilidad con un 95 % de confianza. En la fila inferior se muestra la localización del sitio estudiado en la parte izquierda. En el centro se presenta el intervalo de edad más probable para la última exposición al fuego del piso analizado, obtenido a partir de la probabilidad combinada de los tres parámetros magnéticos determinados en el laboratorio, calculado también al 95 % de confianza.

etnias; actualmente se encuentra en discusión si fueron los chichimecas quienes la fundaron o una cultura desconocida, a la cual se le ha atribuido el título de «Tradición Bajío» (Cárdenas 2010). Se cree que al cabo de 300 años de haberse construido y poblado la ciudad, esta fue destruida, quemada y posteriormente abandonada.

A fin de aportar evidencias científicas de tales acontecimientos, que culminaron con el abandono de la ciudad, se realizó, bajo la supervisión de personal del Centro INAH Guanajuato, la datación arqueomagnética de un piso quemado de este sitio.

## METODOLOGÍA

### Muestreo arqueomagnético

Se orientó *in situ* un fragmento de piso quemado de la estructura este del conjunto arquitectónico, tra-

zando sobre este una línea paralela a la dirección N-S indicada por la brújula (figs. 3a y 3b). Se desprendió el fragmento y se embolsó para su transporte a las instalaciones del Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN) para su ulterior procesamiento.

### Preparación de las muestras

Primeramente se marcaron sobre la superficie del fragmento de piso líneas paralelas a la marca de orientación de campo. Posteriormente, se cortó en fragmentos cúbicos de 1" por lado, obteniéndose 12 especímenes: 6 de la parte superior y 6 de la inferior del fragmento (figs. 3c y 3d).

### Determinaciones arqueomagnéticas

La dirección (declinación, inclinación) y la intensidad de la remanencia magnética de las muestras

se miden directamente en el laboratorio con un magnetómetro; mientras que la intensidad de campo antiguo (arqueointensidad) se determina, indirectamente, por medio de uno de varios métodos conocidos (v. g. Morales 1995). Estos son, en esencia, métodos de inversión magnética: conocido el efecto de un fenómeno (remanencia magnética) se estima la causa (arqueointensidad). Los parámetros direccionales declinación (Dec), inclinación (Inc) e intensidad (Int) fueron obtenidos a partir de experimentos tipo Thellier-Coe (Thellier y Thellier 1959; Coe 1967; Coe *et al.* 1978) utilizados en esta investigación.

### **Datación arqueomagnética**

La datación magnética del fragmento de piso analizado (edad más probable de su última exposición al fuego) se realizó mediante la determinación de la densidad de probabilidad para los tres parámetros magnéticos determinados, por medio de estadística bayesiana implementada en *Matlab* por Pavón-Carrasco *et al.* (2011). Como curva de referencia se utilizó el modelo global *CALS3k* de Korte *et al.* (2009) para los últimos 3 milenios, calculado para la posición geográfica del sitio en cuestión.

## **RESULTADOS**

Los resultados de las determinaciones de los parámetros magnéticos Dec = 351.5°, Inc = 20.3° ( $\alpha_{95} = 2.8^\circ$ ) y AI =  $(46.6 \pm 1.32) \mu\text{T}$  generan como resultado, de forma individual, los intervalos mostrados en la fila central de la figura 4. La probabilidad combinada de los tres parámetros anteriores entrega, como edad más probable de la última exposición al fuego del piso en cuestión, el intervalo mostrado en la parte central de la fila inferior de la figura 4, i. e. [907AD 997AD].

## **DISCUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES**

La edad obtenida en este estudio, como la más probable para la última exposición al fuego del piso analizado, es bastante consistente con las evidencias arqueológicas disponibles para el sitio Plazuelas. Difícilmente una exposición posterior al fuego (ya sea de origen natural o provocada) daría como resultado una combinación de valores para estos

tres parámetros magnéticos que convergieran en el intervalo de edad estimado para el abandono del sitio en cuestión. El resultado obtenido es, además, producto de una técnica analítica ampliamente apoyada por las bases científicas del paleomagnetismo.

A diferencia de la naturaleza escalar de los «relojes naturales» en los que se fundamentan la mayoría de los métodos tradicionales (isotópicos, radiométricos, etc.), la naturaleza vectorial del «reloj magnético» le confiere a la datación arqueomagnética ciertas ventajas sobre los primeros.

La datación magnética se ha asociado tradicionalmente a la asignación de una edad —o intervalo de edades— a una pieza arqueológica por medio del estudio de la magnetización remanente adquirida por dicha pieza al momento de su elaboración, o bien durante su última exposición al fuego (arqueomagnetismo). Cada día, sin embargo, sus alcances se ven ampliados al encontrar en la datación magnética una herramienta con objetivos multidisciplinarios. Así, esta ha encontrado aplicaciones varias que van desde la autenticación de piezas consideradas como patrimonio cultural, hasta el análisis de la procedencia de materiales de construcción de estructuras hidráulicas.

Aun en épocas anteriores al siglo XVIII, a partir del cual se realizaron los primeros registros magnéticos, las investigaciones arqueomagnéticas son de gran utilidad en los estudios arquitectónicos (carentes de registros magnéticos instrumentales) como un medio alternativo de datación en aquellos casos en los cuales no se dispone de carbón asociado a alguna pieza para su datación tradicional por  $^{14}\text{C}$ .

### **Agradecimientos**

Agradecemos a César Berkovich, estudiante del Posgrado en Ciencia de la Tierra, UNAM, por su apoyo durante el trabajo de laboratorio. Esta investigación fue apoyada financieramente por el proyecto UNAM-PAPIIT 105214.

### **Sobre los autores**

JUAN MORALES ([jmorales@geofisica.unam.mx](mailto:jmorales@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus líneas de investigación destaca el arqueomagnetismo, con contribuciones importantes tanto en Mesoamérica como en otras partes del

mundo. Actualmente es responsable del Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) y corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional.

CARLOS CASTAÑEDA LÓPEZ es Maestro en Ciencias Antropológicas por la Universidad Veracruzana y profesor investigador en el Instituto Nacional de Antropología e Historia. Se ha destacado por sus investigaciones en el estado de Guanajuato, principalmente como Director del Proyecto Plazuelas en Pénjamo, Gto. (amatlan14@hotmail.com).

EFRAÍN CÁRDENAS GARCÍA (efrain@colmich.edu.mx) es Arqueólogo por la Escuela Nacional de Antropología e Historia, Maestro en Antropología Social por El Colegio de Michoacán y Doctor en Arquitectura por la UMSNH. Sus investigaciones se han centrado en la arqueología del occidente mexicano. Ha explorado diversas zonas arqueológicas como Ihuatzio, Tzintzuntzan, Peralta y Cerro Curutarán.

AVTO GOGUITCHAICHVILI (avto@geofisica.unam.mx) es Licenciado en Física por la Universidad Estatal de Tbilisi (República de Georgia), Maestro y Doctor en Geofísica con especialidad de geomagnetismo por la Universidad de Montpellier, Francia. Actualmente es investigador titular del Instituto de Geofísica, Campus Morelia de la UNAM, y corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional (<http://www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/>).

PAVÓN-CARRASCO, F. J., J. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M. L. OSETE, J. M. TORTA. 2011. A Matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science* 38: 408-419.

THELLIER, E., O. THELLIER. 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annales Geophysicae* 15: 285-376.

## REFERENCIAS

- CÁRDENAS GARCÍA, E. 2010. *Peralta, Guanajuato*. Colegio de Michoacán/Arqueomex.
- CASTAÑEDA LÓPEZ, C. 2010. *Plazuelas Guanajuato, zona arqueológica*. INAH, México.
- 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.
- COE, R. S., S. GROMMÉ, E. A. MANKINEN. 1978. Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low. *Journal of Geophysical Research* 83/B4: 1740-1756.
- KORTE, M., F. DONADINI, C. G. CONSTABLE. 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka: 2. A new series of time-varying global models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10/6. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GC002297>.
- MORALES, J. 1995. *Determinación de paleointensidades del campo geomagnético para el Cuaternario en la Sierra Chichinautzin*. Tesis de Maestría inédita. UNAM, México.

## AVANCE DE INVESTIGACIÓN

# EVIDENCIA DE ESCORIAS DE COBRE PREHISPÁNICAS EN EL ÁREA DE SANTA CLARA DEL COBRE, MICHOACÁN, OCCIDENTE DE MÉXICO

*Evidence of Prehispanic Copper Slags from the Santa Clara del Cobre Area, Michoacan, Western Mexico*

José Luis Punzo Díaz,\* Juan Morales\*\* y Avto Goguitchaichvili\*\*

\* Instituto Nacional de Antropología e Historia, México; \*\* SAN, Instituto de Geofísica, UNAM, México

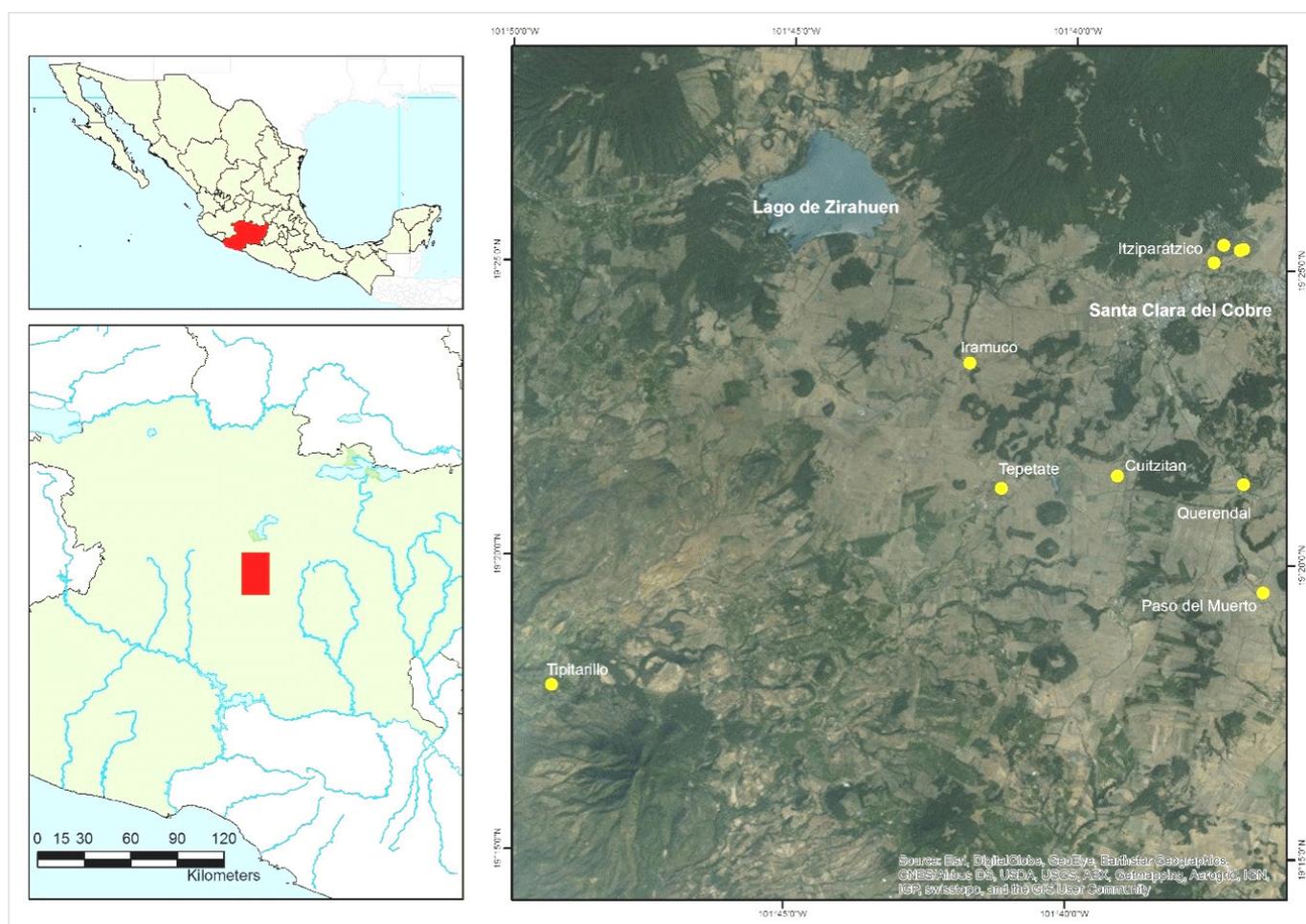


Figura 1. Mapa de ubicación del área de investigación y sitios arqueológicos incluidos en el estudio.

**RESUMEN.** En este artículo se presentan los primeros resultados de dataciones para objetos arqueológicos metálicos en Mesoamérica. A través del análisis arqueomagnético de las escorias, producto de

la fundición del cobre en siete sitios arqueológicos de los alrededores de Santa Clara del Cobre, Michoacán, se logró ubicarlas cronológicamente; pudiendo determinar la presencia de esta tecnología de

Recibido: 15-X-2015. Aceptado: 21-X-2015. Publicado: 27-X-2015.



Figura 2. Escorias metálicas del sitio arqueológico de Itziparátzico, municipio de Salvador Escalante, Michoacán.

*fundición desde los últimos cien años antes de la llegada de los españoles, durante el esplendor del Señorío Tarasco, hasta adentrado el siglo XVIII, cuando nuevas tecnologías y una producción masiva de cobre se desarrollaron en todos los territorios bajo el dominio español.*

**PALABRAS CLAVE:** *escorias, cobre, arqueomagnetismo, arqueología del occidente de México.*

**ABSTRACT.** *This paper presents the first magnetic dating of metal items in Mesoamerica. The archaeomagnetic analysis of the slags, the residual product of the copper smelting process from seven archaeological sites near the town of Santa Clara del Cobre, Michoacán State, made it possible to estimate their production time. The results obtained thus far suggest the presence of smelting technology in this area 100 years before the Spanish conquest, synchronous of apogee of the Tarascan Señorío, until the XVIII century when the development of new technologies and a massive production of copper occurred in whole territories under the Spanish dominance.*

**KEYWORDS:** *Slags, Copper, Archaeomagnetism, Archaeology of western Mexico.*

## INTRODUCCIÓN

La producción de objetos metálicos en época prehispánica y colonial es un tema aún insuficientemen-

te tratado por la arqueología. Poco sabemos de los procesos, de los lugares de producción, o incluso de las propias minas que fueron explotadas antes y tras la llegada de los españoles. Si bien ha habido trabajos muy relevantes en el occidente de México que apuntan datos importantes (Pollard 1987; Hosler 1994; Maldonado 2006; Barret 1987), aún queda mucho camino por andar.

Fue en ese sentido que se diseñó un proyecto arqueológico por parte del Centro INAH Michoacán, que desde el año 2013 ha realizado amplios recorridos arqueológicos en una vasta área que abarca desde los límites de la cuenca del lago de Pátzcuaro al norte —donde se encuentran áreas de fundición y posible producción de objetos metálicos como los sitios aquí presentados en los alrededores de Santa Clara del Cobre (fig. 1)— hasta la tierra caliente michoacana en el río Balsas al sur; región donde se encontraban las minas más importantes, explotadas desde tiempos prehispánicos, como las de Inguaran, Cutzian y Churumuco. Esta región ha sido muy significativa para la minería y producción de objetos metálicos desde un poco antes de la llegada de los españoles, en tiempos virreinales y hasta el día de hoy.

El estudio de estas escorias de fundición nos permite, por primera vez en la región mesoamericana, poder tener dataciones de materiales metálicos por medios arqueomagnéticos; los que nos han permitido ubicar estas en el tiempo y poder asumir entonces una continuidad de trabajos metalúrgicos en esta área de Michoacán desde épocas prehispánicas hasta el periodo colonial.

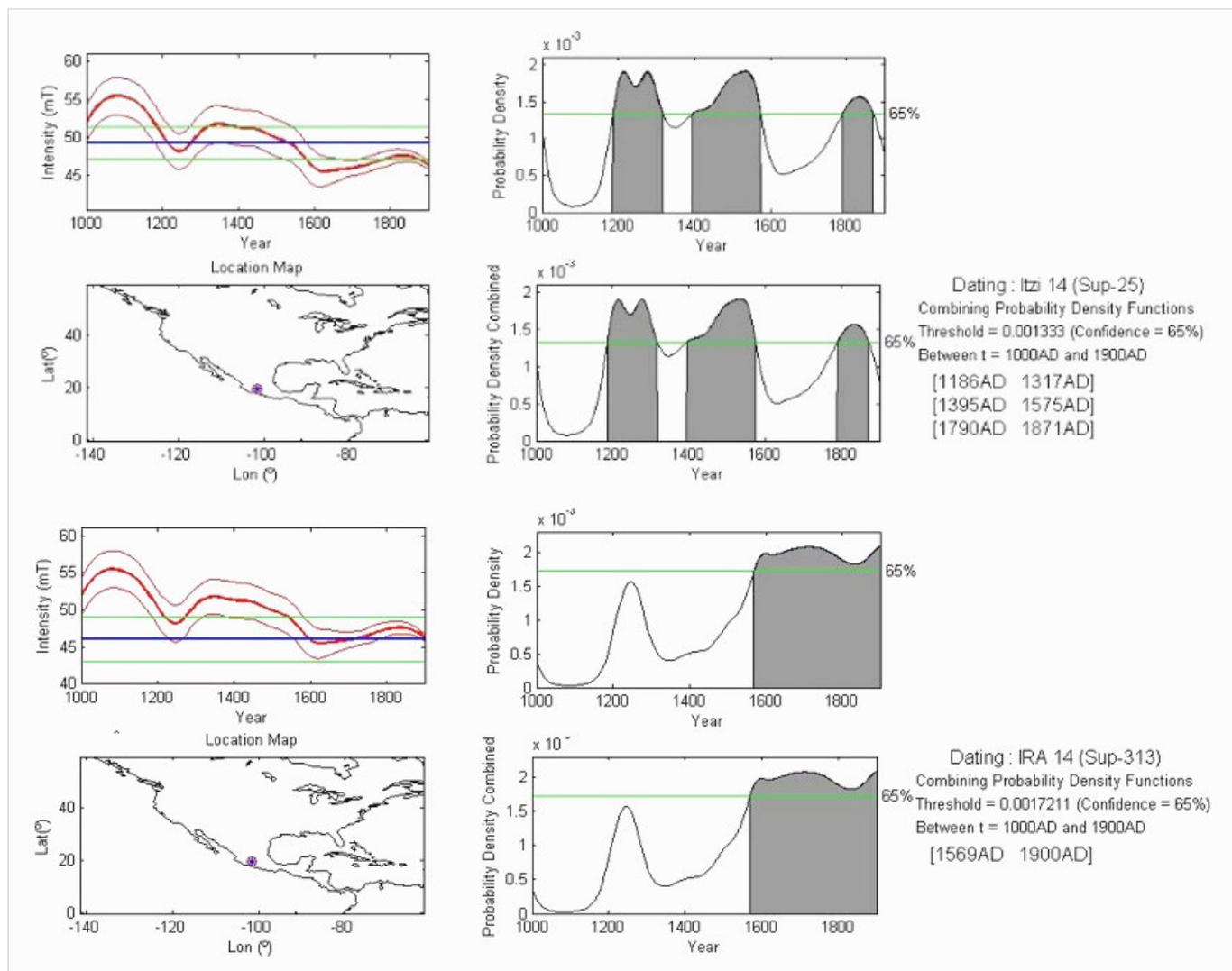


Figura 3. Dataciones arqueomagnéticas de los sitios de Itziparátzico e Irámuco.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales arqueológicos fueron recuperados mediante recorridos sistemáticos de superficie hechos en siete sitios arqueológicos prehispánicos y coloniales que poseen restos de trabajos metalúrgicos, ubicados en los municipios de Salvador Escalante y Ario (fig. 1).

Los materiales analizados son escorias producto del proceso de fundición del cobre (fig. 2). Estos desechos de la fundición generalmente contienen una mezcla de una gran cantidad de metales, producto de la composición de la propia mena de donde fue obtenido el mineral. Durante el proceso de fundición del cobre, las impurezas son separadas formando la escoria, la cual se retiró produciendo láminas de colores oscuros, con una apariencia reluciente en la superficie. Los análisis de las muestras fueron llevados a cabo en las instalaciones del Servicio Arqueo-

magnético Nacional (SAN), ubicadas en el Campus Morelia del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

### *Método arqueomagnético usado*

La remanencia magnética (magnetización) de las muestras se mide directamente en el laboratorio mediante un magnetómetro; mientras que la intensidad de campo antiguo (arqueointensidad) que la indujo se determina, indirectamente, por medio de uno de varios métodos conocidos para tal fin (v. g. Morales 1995). Estos son, en esencia, métodos de inversión magnética: conocido el efecto (magnetización) de un fenómeno (campo magnético antiguo), se determina su causa (arqueointensidad).

La datación magnética (edad más probable de producción) se realizó mediante la determinación de la densidad de probabilidad para la arqueointensidad



Figura 4. Escorias de cobre producto de fundiciones a gran escala en el sitio del Tepetate, Salvador Escalante, Michoacán.

magnética determinada por medio de estadística bayesiana (Lanos 2004), implementada en *Matlab* por Pavón-Carrasco *et al.* (2011). Como curva de referencia se utilizó el modelo global *CALS3k* de Korte *et al.* (2009) para los últimos 3 milenios, calculado para la posición geográfica de la región en cuestión. Es importante resaltar que en la figura 3 se presentan ejemplos de los rangos presentes en las dataciones. No obstante, para la presentación en el apartado de resultados y discusión, se eligieron los más factibles según los materiales arqueológicos asociados y los rangos más probables que arrojó el análisis.

## RESULTADOS

Los sitios arqueológicos registrados se pueden concentrar en dos grupos principales. El primero corresponde a sitios donde encontramos, en el mismo lugar, elementos arqueológicos de factura prehispánica asociada al periodo Tarasco tardío, posiblemente

te de los siglos XV-XVI, en conjunto con elementos producidos en época del contacto con la cultura hispana; es decir, se trata de lugares que fueron habitados desde la época prehispánica y que continuaron con su habitación durante la época virreinal.

De este conjunto destaca sobre los demás el sitio de Itziparátzico, muy cercano al actual poblado de Santa Clara del Cobre. Se trata de un asentamiento prehispánico donde se ha encontrado una gran cantidad de escorias metálicas (llamadas *querendas* en la zona), así como posibles hornos para la fundición del cobre. Sin embargo, no se había podido determinar si esta poseía o no un componente prehispánico o se trataba más bien de una producción de tiempos virreinales o aún más recientes (Cárdenas y Fernández-Villanueva 2004; Maldonado 2006). De este sitio se analizaron cuatro muestras, de las cuales dos tuvieron buena respuesta y se pudieron fechar. La muestra ITZI14Sup25 corresponde al sector sur del sitio donde existen abundantes restos de escoria, materiales cerámicos prehispánicos y colonia-

les al lado de manantiales que le dan el nombre al sitio. Esta muestra se fecha en 1395-1575 d. C. (fig. 3) y la segunda, ITZ114Sup65, corresponde al sector este del sitio donde se encuentran varias estructuras arquitectónicas y materiales arqueológicos de prestigio asociados al periodo Tarasco tardío. Esta muestra arrojó una datación de 1591-1691 d. C.

Otro sitio de esta misma categoría es el de Tipitarillo, en donde se han encontrado muy pocos ejemplos de escorias. En este lugar se construyó un muy importante poblado del periodo Tarasco, que queda aún de manifiesto en los imponentes edificios que ahí se encuentran. De este lugar se procesó una muestra TPI114Sup316 con datación de 1583 a 1755 d. C. Finalmente, el sitio de Cuitzitan es un pequeño asentamiento a orillas del poblado del mismo nombre, donde se localizó una concentración de materiales arqueológicos prehispánicos y virreinales, entre los cuales se hallaron algunas muestras de escorias. De este lugar se obtuvo una fecha de 1431 a 1582 d. C. mediante la muestra CUITSup315.

El segundo grupo de sitios arqueológicos lo conforman los asentamientos de Iramuco (IRA14Sup-313 fechó 1569-1900 d. C., fig. 3), Paso del Muerto (PAMU14Sup263 fechó 996-1184 d. C.), el Querendal (desafortunadamente las muestras no arrojaron elementos para la datación) y el Tepetate (TEPE14-Sup261 fechó 1179-1575 d. C. y 1786-1875 d. C.). En estos sitios se pueden hallar enormes cantidades de escorias, que fueron producto de procesos de fundición a una escala mucho mayor que en los sitios anteriores; encontrándose solamente materiales arqueológicos virreinales e históricos recientes, sin evidencia alguna de ocupación prehispánica.

Vale la pena notar que para los asentamientos de este grupo, especialmente para el de Paso del Muerto, las dataciones asignadas parecieran disentir del contexto arqueológico virreinal o histórico de los vestigios encontrados. No obstante, tal discordancia podría ser atribuida a la existencia de una anomalía magnética local debida a la abundante cantidad de material magnético superficial. Esto es algo común en los yacimientos de hierro. De esta manera, la elección del intervalo más probable deberá tomarse en base a consideraciones contextuales.

## DISCUSIÓN

El centro del Señorío Tarasco se ubicó en la zona del lago de Pátzcuaro y especialmente en su capital: Tzintzuntzan. Desde esta ciudad, el *cazonci* (gran

señor) de Michoacán controló de manera directa todos los pasos de la producción de objetos metálicos en su territorio. Estos fueron objetos del más alto valor ritual, simbólico y de prestigio en la sociedad tarasca. A través del informe levantado por Vasco de Quiroga en 1533 —donde inquiriere a varios encomenderos españoles, caciques y fundidores tarascos sobre el estado de las minas de cobre de la Tierra Caliente (Warren 1968)— sabemos que cuando menos el primer paso —el de la extracción, molienda y fundición— se realizaba en las minas directamente. Los datos aquí presentados nos permiten ahora suponer que en lugares como Itziparátzico y Cuitzitan seguramente se llevaron a cabo procesos de refinamiento y fundición del cobre poco antes de la llegada de los españoles, generando las escorias analizadas.

A través de las fuentes históricas sabemos que a Santa Clara se le agregó desde el año 1533 el apelativo «de los cobres», lo que nos indica la muy temprana vocación del poblado para el trabajo del metal, durante el virreinato. Ya en 1606 en Santa Clara se instaló la Fundición Real bajo administración directa de la Corona española (Gavira 2009), convirtiéndose desde entonces en uno de los lugares más importantes del trabajo metalúrgico en México. Estos datos nos permiten entender por qué los sitios de Itziparátzico, Tipitarillo, Cuitzitan, Irámuco y el Tepetate tienen dataciones que caen en el siglo XVI y posibilitan tender el puente entre los conocimientos prehispánicos y coloniales tempranos.

En el siglo XVIII, tanto en España como en el resto de sus territorios, existió una gran demanda de cobre, especialmente para la forja de cañones, el recubrimiento de cascos de navíos de guerra y para la acuñación de moneda; siendo la fundición real de Santa Clara uno de las más importantes proveedores de metal en ese momento (Gavira 2009). Las fundiciones no funcionaron solamente en el poblado de Santa Clara sino que en sus cercanías, en pequeños sitios, se realizaban dichos trabajos. Como ejemplos de estos ahora podemos incluir, gracias a las dataciones, a sitios como Iramuco o el Tepetate, donde tenemos enormes cantidades de escorias, testigos del incremento en la fundición de cobre (fig. 4). Si bien esta región de Michoacán siempre ha presumido de la existencia de una profunda continuidad histórica en la producción de objetos de cobre, que hasta el día de hoy dan fama a los artesanos de Santa Clara, es ahora que podemos apuntar realmente a una persistencia de esta tecnología desde época prehispánica hasta la actualidad.

## Agradecimientos

Los autores dan las gracias a los estudiantes y compañeros del Centro INAH-Michoacán y del Instituto de Geofísica, Campus Morelia, ya que sin ellos no hubiera sido posible llevar a cabo esta investigación.

## Sobre los autores

JOSÉ LUIS PUNZO ([jose\\_punzo@inah.gob.mx](mailto:jose_punzo@inah.gob.mx)) es Licenciado y Doctor en Arqueología por la Escuela Nacional de Antropología e Historia y Maestro en Ciencias y Humanidades por la Universidad Juárez del Estado de Durango. Actualmente es investigador de tiempo completo del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Entre sus líneas de investigación está el estudio de la metalurgia durante los periodos prehispánico y colonial temprano en Michoacán.

JUAN MORALES ([jmorales@geofisica.unam.mx](mailto:jmorales@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus líneas de investigación destaca el arqueomagnetismo, con contribuciones importantes tanto en Mesoamérica como en otras partes del mundo. Actualmente es responsable del Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA), Campus Morelia de la UNAM, y corresponsable del Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN).

AVTO GOGUITCHACHVILI ([avto@geofisica.unam.mx](mailto:avto@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física por la Universidad Estatal de Tbilisi (República de Georgia), Maestro y Doctor en Geofísica con especialidad de geomagnetismo por la Universidad de Montpellier, Francia. Actualmente es investigador titular del Instituto de Geofísica de la UNAM y corresponsable del recién creado SAN (<http://www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/>).

HOSLER, D. 1994. *The Sounds and Color of Power. The Sacred Metallurgical Technology of Ancient West Mexico*. Cambridge: MIT Press.

LANOS, P. 2004. Bayesian Inference of Calibration Curves: Application to Archaeomagnetism. En *Tools for Constructing Chronologies: Crossing Disciplinary Boundaries*, editado por C. Buck y A. Millard, pp. 43-82. Lecture Notes in Statistics 177. Londres: Springer-Verlag.

MALDONADO, B. 2006. *Preindustrial copper production at the archaeological site of Itziparatzico, a Tarascan location in Michoacan, Mexico*. Tesis doctoral. Pennsylvania State University.

MORALES, J. 1995. *Determinación de paleointensidades del campo geomagnético para el Cuaternario en la Sierra Chichinautzin*. Tesis de Maestría inédita. UNAM, México.

PAVÓN-CARRASCO, F. J., J. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M. L. OSETE, J. M. TORTA. 2011. A Matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science* 38: 408-419.

POLLARD, H. 1987. The Political Economy of Prehispanic Tarascan Metallurgy. *American Antiquity* 52/4: 741-752.

WARREN, B. 1968. Las minas de cobre de Michoacán, 1533. *Anales del Museo Michoacano* 6: 35-52.

## REFERENCIAS CITADAS

BARRET, E. 1987. *The Mexican Colonial Copper Industry*. Albuquerque: University of New Mexico Press.

CÁRDENAS, E., FERNÁNDEZ-VILLANUEVA, E. 2004. La metalurgia en Santa Clara del Cobre: ¿una tradición prehispánica? En *Ritmo del Fuego*, editado por M. Feder-Nadoff. Chicago: Cuentos Foundation.

GAVIRA, M. C. 2009. Tecnología para fundir y refinar el cobre en Michoacán (Nueva España): la fábrica de Santa Clara del Cobre a fines del siglo XVIII. *Cuadernos de Historia* 31: 7-29.

## AVANCE DE INVESTIGACIÓN

# PRIMER INTENTO DE DATACIÓN DE PINTURAS MURALES MESOAMERICANAS

## *First Attempt to Date Mesoamerican Mural Paintings*

*Avto Goguitchaichvili,\* Juan Morales,\* Rodrigo Esparza López,\*\* Ana María Soler,\* Jaime Urrutia Fucugauchi\* y Miguel Cervantes Solano\**

\* Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN), Instituto de Geofísica, UNAM, México; \*\* El Colegio de Michoacán, México



Figura 1a. Técnica de orientación y toma de muestras (ver en Goguitchaichvili *et al.* 2004 mayores detalles).

**RESUMEN.** Se reporta, por vez primera, el intento de datación de cuatro pinturas murales del centro de México: Templo de Venus (Cacaxtla), Templo Rojo (Templo Mayor, Tenochtitlan), Chapulines y Estrellas (Cholula). Estos sitios corresponden al periodo Clásico y Posclásico Temprano de la cronología mesoamericana. Las edades obtenidas para Chapulines (1105-1194 A. D.), Templo de Venus (1002-1308 A.

Recibido: 4-1-2016. Aceptado: 4-1-2016. Publicado: 8-1-2016.



Figura 1b. Técnica de orientación y toma de muestras (ver en Goguitchaichvili *et al.* 2004 mayores detalles).

D.) y Estrellas (340-649 A. D.) están dentro de la cronología y contexto arqueológico de los sitios estudiados. Sin embargo, la edad de Templo Rojo (1829-1888 A. D.) señala a una edad demasiado tardía no compatible con la cronología reportada. Por tanto, cabe la posibilidad de que la magnetización pudiera haber sufrido alguna alteración después de haber sido aplicada.

**PALABRAS CLAVE:** Mesoamérica, pinturas murales, Tenochtitlan, magnetización pictórica, hematita.

**ABSTRACT.** We report the results of the first attempt to date four mural paintings from sites in Central Mexico: the Temple of Venus (Cacaxtla), the Red Temple (part of the Templo Mayor complex in Tenochtitlan), and the Chapulines and Estrellas temples (Cholula). These sites correspond to the Classic and Early Postclassic period of the Mesoamerican chronology. The ages obtained for the Chapulines (1105-1194 AD), Temple of Venus (1002-1308 AD) and Estrellas (340-649 AD) murals are within the accepted chronology and archaeological context of their respective sites. However, the date range that we obtained for the Red Temple (1829-1888 AD) points to a time period incompatible with Tenochtitlan's established chronology. It is possible that the mural's pictorial magnetization suffered some alteration over time.

**KEYWORDS:** Mesoamerica, Mural paintings, Tenochtitlan, Pictorial remanent magnetization, Hematite.

## LA PINTURA MURAL DURANTE EL CLÁSICO MESOAMERICANO

La pintura mural mesoamericana tiene sus raíces en el legado cultural de los olmecas, reflejado en Mesoamérica durante el periodo Clásico del México antiguo, que se inicia en el año 100 d. C. y termina en el 900 d. C. Durante este periodo hay un notable desarrollo cultural en varios puntos del área mesoamericana, principalmente en el centro de México y en el sureste (península de Yucatán y Oaxaca).

Algunas de las características que podemos observar durante este periodo son: el incremento e implantación de nuevas técnicas agrícolas, el aumento en la densidad de población, la aparición de nuevos centros ceremoniales urbanos planificados, el desarrollo del comercio y consiguientes formas de contacto cultural con pueblos de otras regiones; la aparición de nuevas estructuras sociales, económicas, políticas y religiosas y el desarrollo de las distintas artes, la arquitectura, la precisión en los sistemas de calendarios y de formas de escritura. Especialmente emerge la pintura mural como una forma importante de comunicación visual y estilística con una destreza y características únicas; algunos de los ejemplos más importantes en este arte mural los podemos apreciar en los sitios arqueológicos de Teotihuacan, Cacaxtla, Cholula y Bonampak, por citar algunos.

Teotihuacan fue el primero y más importante centro donde llegó a florecer el urbanismo y muchos de los elementos característicos de la etapa clásica. Teotihuacan se convirtió en un centro urbano de gran extensión; influyó en un territorio considerablemente amplio, ejerciendo autoridad política sobre numerosos señoríos de la región central (Lombardo 1995).

Con el estudio de las pinturas murales, las esculturas, la cerámica y otros vestigios encontrados, podemos conocer algo de lo que fue la simbología, el calendario, la religión y el pensamiento del mundo teotihuacano. Así consta la existencia de un culto a la serpiente emplumada, símbolo del dios Quetzalcóatl. Las representaciones de otros dioses como Tláloc, la deidad de la lluvia, Chalchiuhtlicue, la señora de las aguas terrestres, significan posiblemente la adopción de prácticas y creencias provenientes de las costas del Golfo (Angulo 1995).

Por otro lado, Cacaxtla fue uno de los más importantes hallazgos arqueológicos del siglo XX por sus influencias con mayas, teotihuacanos, mixtecas, zapotecas y nahuatlacas; fácil de observar a través

Tabla 1. Elementos magnéticos y sus parámetros de precisión tomados de Goguitchaichvili *et al.* (2004) junto con las edades estimadas de la pintura mural analizada.

<b>Mural</b>	<b>N</b>	<b>Dec (°)</b>	<b>Inc (°)</b>	<b><math>\alpha_{95}</math> (°)</b>	<b>k</b>	<b>EDADES (A . D.)</b>
Chapulines	7	339.8	47.1	7.5	65	<b>1105/1194</b>
Estrellas	10	351.8	48.3	10.4	63	<b>340/649</b>
Templo Rojo	5	16.8	44.1	5.3	209	<b>1829/1888</b>
Templo Venus	6	348.7	35.1	10	46	<b>1002/1308</b>

de su impresionante conjunto mural que, actualmente, es uno de los más extensos y mejor conservados de toda Mesoamérica (Lombardo 1995).

Durante mucho tiempo se creyó que fueron los olmecas-xicalancas sus fundadores, pero estudios más recientes invitan a reconsiderar que fue en realidad una cultura contemporánea a los olmecas la que la fundó, ya que fue construida en el año 300 a. C. y sus murales se pintaron entre los años 640 y 800 d. C. En Cacaxtla se pueden observar extraordinarios murales de estilo maya, glifos nahuas, ideas y formas de dos áreas muy distantes que se fundie-

ron en una extraordinaria creación pictórica y de gran simbolismo representando batallas, personajes, fechas de calendario y algunos dioses.

En Cholula, Puebla, a un costado de la gran pirámide cholulteca, se encuentra el mural denominado como «Los bebedores», fechado al inicio de la época Cholula II (200 d. C.) que fuera cubierto al final del mismo periodo (350 d. C.) por otra estructura mayor. La pintura ornamenta 56 m de largo por 2.5 m de altura de la cara interior de un muro que delimitaba un espacio palaciego, y constituye una de las obras pictóricas de gran formato más extraordina-

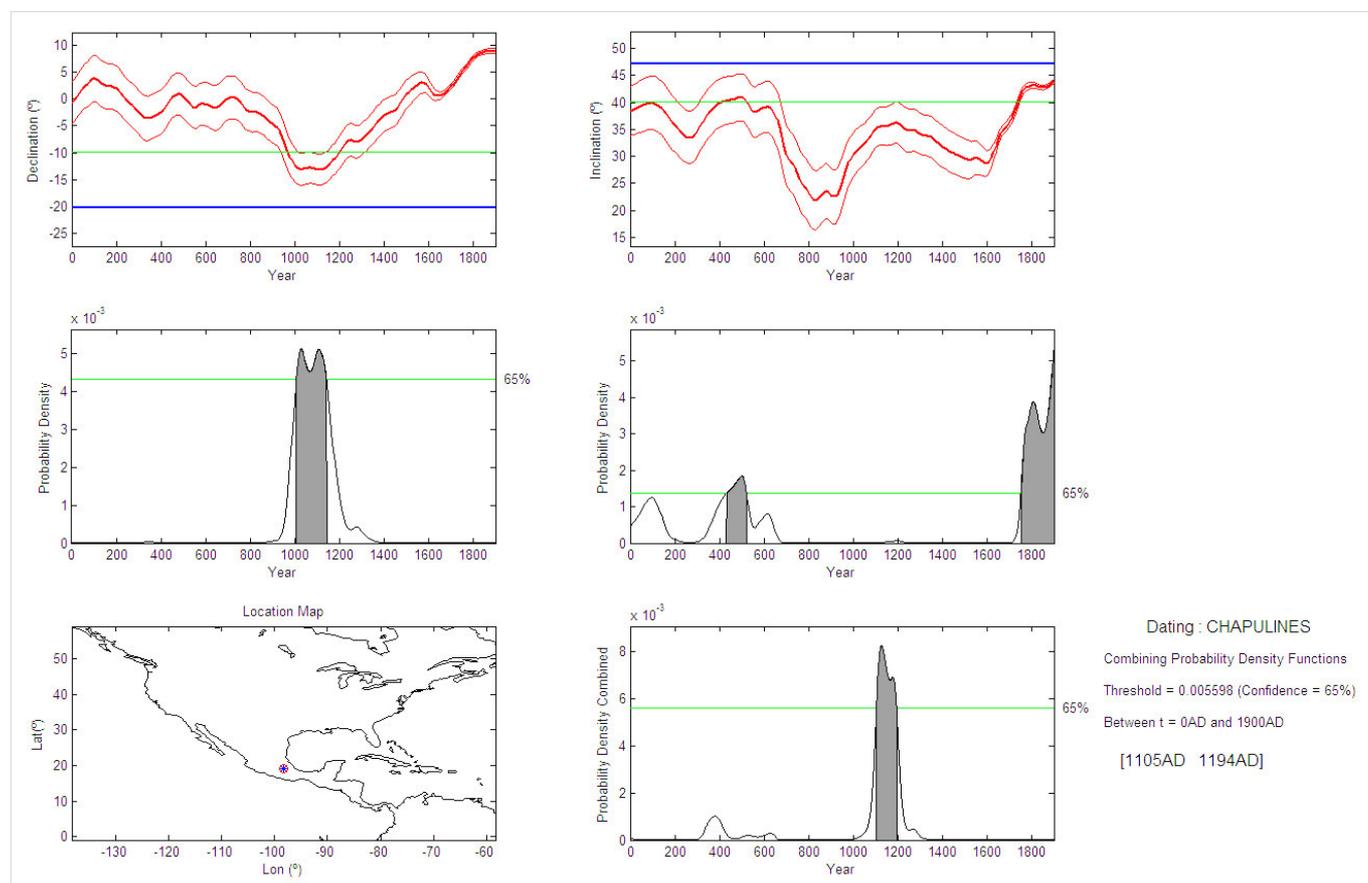


Figura 2. Resultado de la datación arqueomagnética para el mural de Chapulines (Complejo de Cholula, Puebla).

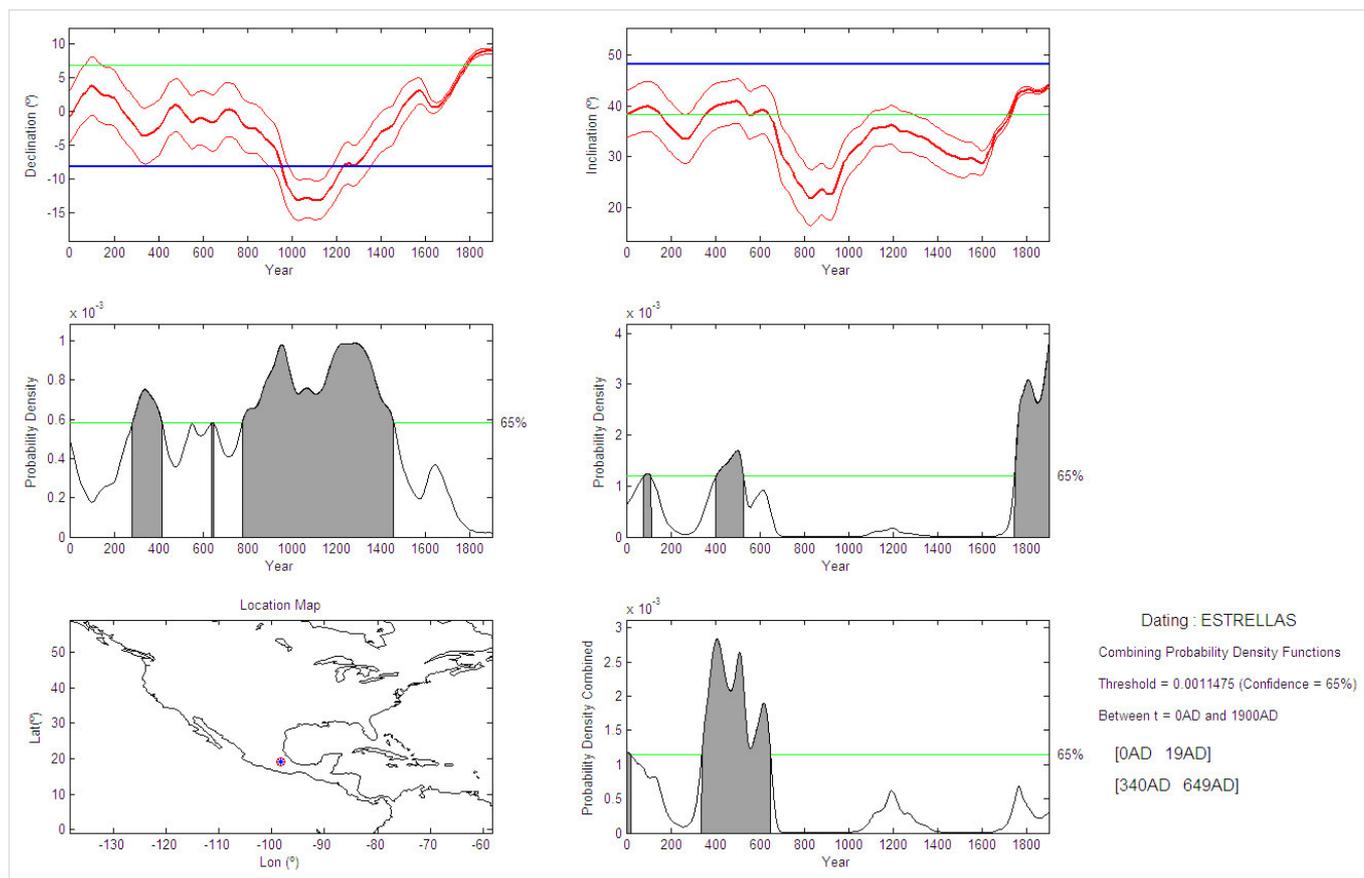


Figura 3. Resultado de la datación arqueomagnética para el mural de Estrellas (Complejo de Cholula, Puebla).

rias de Mesoamérica por la desinhibición de su temática. Los bebedores de Cholula tal vez sea la versión pictográfica más antigua de «un complejo dedicado a los dioses del pulque» (Dumond y Müller 1972).

La declinación del florecimiento clásico no significó el término de la civilización mesoamericana. El reacomodo de pueblos y la fusión que luego ocurrió de nuevos elementos culturales permiten anticipar la existencia de un dinamismo cultural digno de ser analizado y valorado.

## USO DE LA MAGNETIZACIÓN PICTÓRICA PARA FINES DE DATACIÓN

Chiari y Lanza (1997) y Zanella *et al.* (2000) fueron los primeros en mostrar que la mayoría de los tonos rojos de las pinturas murales italianas provienen de pigmentos que contienen partículas de hematita. Al ser aplicado este pigmento en las paredes (fig. 1), sus partículas son libres de moverse y alinearse con la dirección del campo magnético antes de secarse. La dirección derivada de estas pinturas se denomina magnetización remanente pic-

tórica, la cual es consistente con la dirección del campo geomagnético al momento de la pintura.

Goguitchaichvili y colaboradores (2004) aplicaron este método con éxito en murales precolombinos del centro de México. Para el estudio se seleccionaron cuatro pinturas murales del centro de México: Templo de Venus (Cacaxtla), Templo Rojo (Templo Mayor de Tenochtitlan), Chapulines y Estrellas (ambos pertenecientes al complejo de Cholula). Estos sitios corresponden al periodo Clásico y Posclásico Temprano en la cronología mesoamericana (~ 200-1200 d. C. según el catálogo de *Arqueología Mexicana* (2003)).

## DATACIÓN ARQUEOMAGNÉTICA

Goguitchaichvili *et al.* (2004) realizaron un estudio de reconocimiento de cuatro pinturas murales mesoamericanas, a partir del cual la dirección de su magnetización remanente se determinó con éxito (tabla 1). Aparentemente, una mezcla de magnetita y hematita es la responsable de la magnetización, a diferencia de los murales italianos investigados por Chiari y Lanza (1997), en los que solo está presen-

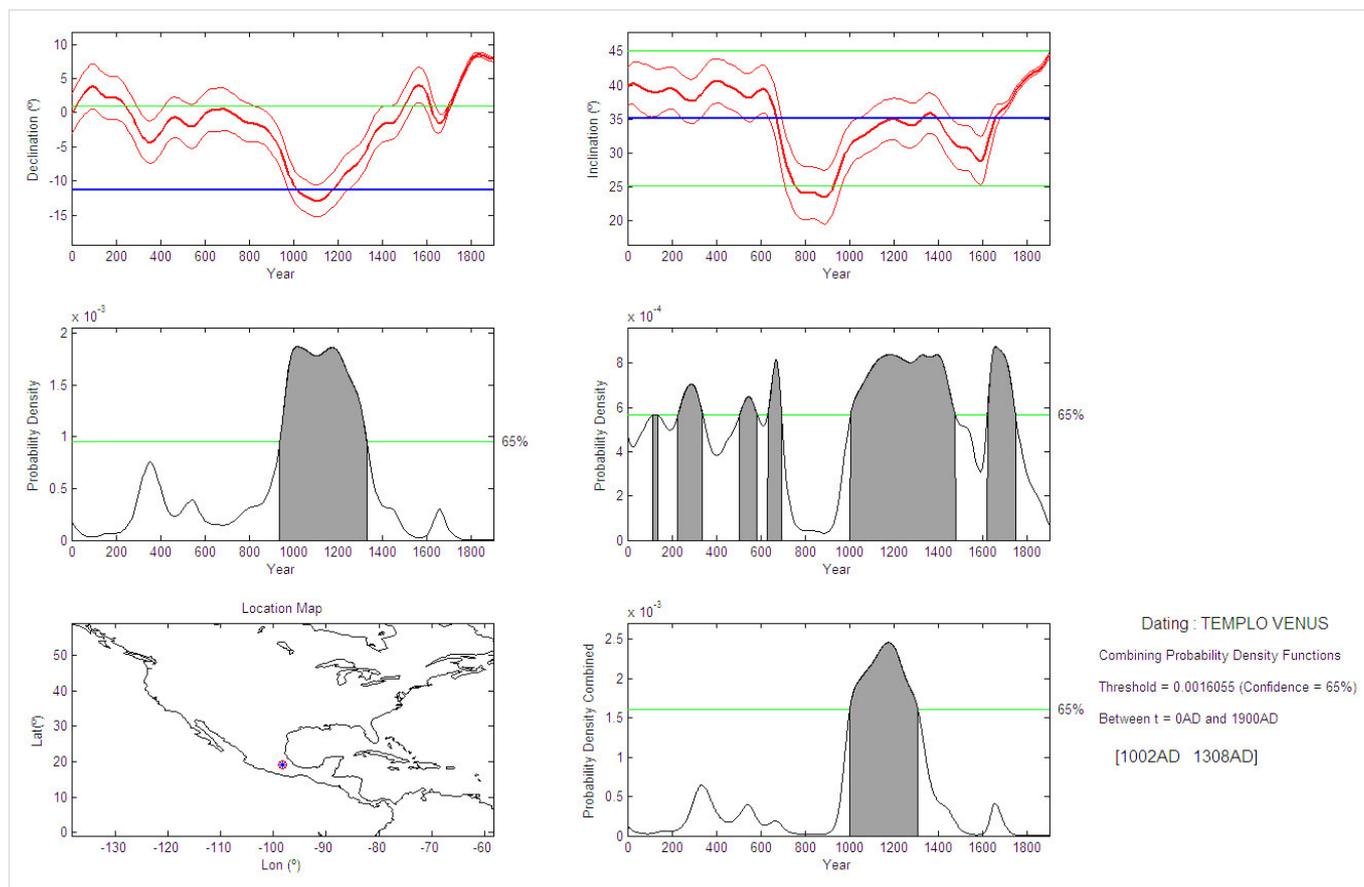


Figura 4. Resultado de la datación arqueomagnética para el mural de Templo de Venus (Complejo de Cacaxtla).

te la hematita. Las pinturas murales mesoamericanas estudiadas mantienen la dirección del campo magnético en el momento en que fueron pintadas y son, por tanto, una valiosa fuente de información sobre la variación secular. Considerando los resultados alentadores obtenidos, hemos estimado la posibilidad de utilizar el método arqueomagnético de datación en pinturas murales empleando la curva arqueomagnética de referencia derivada del modelo SHADIF14K (Pavón-Carrasco *et al.* 2014).

Los posibles intervalos de tiempo de la elaboración de la pintura están reportados en la tabla 1, mientras en las figuras 2 a 4 se muestran detalles de la datación arqueomagnética a través de las variaciones en la declinación e inclinación magnética entre 0 y 1900 años A. D. Las edades estimadas para Chapulines (1105-1194 A. D.), Templo de Venus (1002-1308 A. D.) y Estrellas (340-649 A. D.) están dentro de la cronología y contexto arqueológico vigente de los sitios estudiados. Sin embargo, la edad de Templo Rojo (1829-1888 A. D.) apunta a una fecha demasiado tardía, no concebible dentro de la cronología aceptada. Por tanto, cabe la posibilidad de que la magnetización pudiera haber su-

frido alguna alteración después de haber sido aplicada.

## Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada financieramente por el proyecto UNAM-PAPIIT 105214.

## Sobre los autores

AVTO GOGUITCHAICHVILI ([avto@geofisica.unam.mx](mailto:avto@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física por la Universidad Estatal de Tbilisi (República de Georgia), Maestro y Doctor en Geofísica con especialidad en geomagnetismo por la Universidad de Montpellier, Francia. Actualmente es investigador titular del Instituto de Geofísica, Campus Morelia de la UNAM, y corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional ([www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/](http://www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/)).

JUAN MORALES ([jmorales@geofisica.unam.mx](mailto:jmorales@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de Méxi-

co. Entre sus líneas de investigación destaca el arqueomagnetismo, con contribuciones importantes tanto en Mesoamérica como en otras partes del mundo. Actualmente es responsable del Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) y corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN).

RODRIGO ESPARZA LÓPEZ es Licenciado y Maestro en Arqueología con especialidad en arqueometría por la Escuela Nacional de Antropología e Historia. Doctor en Ciencias Sociales por el CIESAS-Occidente, sus líneas de investigación son el estudio de las sociedades preestatales del Occidente de México y en especial el estudio del comercio e intercambio de la obsidiana. Actualmente es profesor-investigador del Centro de Estudios Arqueológicos de El Colegio de Michoacán, A. C. ([www.colmich.edu.mx](http://www.colmich.edu.mx)). Correo electrónico: [resparza@colmich.edu.mx](mailto:resparza@colmich.edu.mx).

ANA MARÍA SOLER ARECHALDE es Física con Maestría y Doctorado en Sismología y Física del Interior de la Tierra de la UNAM. Lleva más de 10 años trabajando sobre el arqueomagnetismo de México, en particular en datos direccionales dentro del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Ciudad Universitaria, UNAM. También es corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional. Correo electrónico: [anesoler@geofisica.unam.mx](mailto:anesoler@geofisica.unam.mx).

JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI es Ingeniero Geofísico y Maestro en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México. Se doctoró en la Escuela de Física de la Universidad de Newcastle Upon Tyne, Inglaterra. Áreas de interés: paleomagnetismo, exploración geofísica, tectónica, paleoclimas, meteoritos y cráteres de impacto. Es Investigador Titular en el Instituto de Geofísica de la UNAM. Correo electrónico: [juf@geofisica.unam.mx](mailto:juf@geofisica.unam.mx).

MIGUEL CERVANTES SOLANO es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus líneas de investigación destaca la variación secular del campo magnético terrestre a diferente escala. Actualmente es profesor-investigador de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Campus Morelia de la UNAM ([miguel\\_cervantes@enesmorelia.unam.mx](mailto:miguel_cervantes@enesmorelia.unam.mx)).

ANGULO, J. 1995. Teotihuacán: aspectos de la cultura a través de la expresión pictórica. En *La Pintura Mural Prehispánica en México I: Teotihuacán*, editado por B. de la Fuente, tomo II, pp. 65-186. México, D. F.: Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

CHIARI, G., R. LANZA. 1997. Pictorial remanent magnetization as an indicator of secular variation of the Earth's magnetic field. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 101: 79-83.

DUMOND, D., F. MÜLLER. 1972. Classic to Postclassic in Highland Central Mexico. *Science* 175: 1208-1215.

GOGUITCHAICHVILI, A., A. M. SOLER, E. ZANELLA, G. CHIARI, R. LANZA, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, T. GONZÁLEZ. 2004. Pre-Columbian mural paintings from Mesoamerica as geomagnetic field recorders. *Geophysical Research Letters* 31/12. <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL020065>.

LOMBARDO, S. 1995. El estilo teotihuacano en la pintura mural. En *La Pintura Mural Prehispánica en México I: Teotihuacán*, editado por B. de la Fuente, tomo II, pp. 3-64. Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.

PAVÓN-CARRASCO, F. J., M. L. OSETE, J. M. TORTA, A. DE SANTIS. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters* 388: 98-109. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046> >

ZANELLA, E., L. GURIOLI, G. CHIARI, A. CIARALLO, R. CIONI, E. DE CAROLIS, R. LANZA. 2000. Archaeomagnetic results from mural paintings and pyroclastic rocks in Pompeii and Herculaneum. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 118/3-4: 227-240. < [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920199001466](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920199001466) >

## REFERENCIAS

ARQUEOLOGÍA MEXICANA. 2003. *Tiempo Mesoamericano* (2500 A. C.-1521 D. C.). Edición Especial 11.

## AVANCE DE INVESTIGACIÓN

# DATACIÓN DE TINAJAS ARQUEOLÓGICAS DEL SITIO GUACHIMONTONES, OCCIDENTE DE MESOAMÉRICA

*Dating of Archaeological Jars from the Guachimontones Site,  
Western Mesoamerica*

*Miguel Ángel Novillo Verdugo,\* Rodrigo Esparza López,\*  
Avto Goguitchaichvili,\*\* Juan Morales,\*\* Miguel Cervantes Solano\*\**

\* Centro de Estudios Arqueológicos, El Colegio de Michoacán, A. C., México; \*\* SAN, Instituto de Geofísica, UNAM, México



Figura 1. Excavación de una de las tejuineras descubiertas en Talleres 3, Guachimontones, México.

**RESUMEN.** El presente trabajo analiza un conjunto de fragmentos cerámicos correspondientes a tinajas de gran tamaño recuperadas en el sector de

Talleres del sitio arqueológico Guachimontones, Jalisco, México (fig. 1). La cerámica en estudio guardaba relación con unidades habitacionales, sin em-

Recibido: 6-1-2016. Aceptado: 8-1-2016. Publicado: 15-1-2016.

bargo se desconocía su funcionalidad en este espacio. Por tal motivo se aplicaron técnicas arqueométricas y arqueomagnéticas para conocer su uso específico, su funcionamiento dentro de la organización social y su cronología. El punto de partida del análisis es la idea de que estas tinajas sirvieron para la preparación de tejuino (bebida fermentada elaborada a partir de maíz); esto se debe, en gran medida, a las comparaciones etnográficas con otras regiones. Los resultados obtenidos de la datación arqueomagnética nos permitieron comprobar que las tejuineras son parte del periodo Posclásico del sitio, y que las edades obtenidas son muy similares a las ya publicadas para el Posclásico del sitio arqueológico de Guachimontones.

**PALABRAS CLAVE:** Oeste de Mesoamérica, Tradición Teuchitlán, Guachimontones, tinajas arqueológicas.

**ABSTRACT.** This paper analyzes a set of ceramic fragments from giant jars (tejuineras) recovered within the Guachimontones archaeological site, Jalisco State, Mexico. These jars, found at several ceramic workshops, are related to housing units. However, until now the use of these objects and their temporality has been unclear. In order to better characterize and date the archaeological context, archaeometric and archaeomagnetic investigations were performed. The starting point for the analysis is the idea that the jars were used for the preparation of tejuino (fermented drink made from corn); in large part, this theory is based on ethnographic comparisons with other regions. Through archaeomagnetic dating, it was found that tejuineras are dated to the Postclassic period, and that the dates obtained were very similar to those already published for the Guachimontones archaeological site.

**KEYWORDS:** Western Mesoamerica, Teuchitlan tradition, Guachimontones, Large archaeological jars.

## ANTECEDENTES

El consumo de bebidas fermentadas es una práctica común en diferentes partes del mundo y en todos los tiempos. Para el caso de Mesoamérica, se habla de un uso generalizado y constante de bebidas obtenidas a partir del agave; sin embargo hay que mencionar que no solo se consiguen bebidas fermentadas en base a dicha planta, sino también

por medio de una variedad de materias primas como por ejemplo el maíz. De esta forma, para la región de Occidente, probablemente, las bebidas de maíz fueron utilizadas de manera constante. Pese a esto, su empleo se registra con poca frecuencia en el dato histórico, tal vez, por la importancia que se le dio al agave.

Excavaciones sistemáticas realizadas en el sitio Guachimontones a partir del año 2001 registran una serie de elementos culturales como cerámica utilitaria y ritual, restos arquitectónicos de unidades habitacionales, ofrendas, entierros, entre otros, que cronológicamente están asociados al periodo del Posclásico (900 al 1521 d. C.). El sitio de Guachimontones se encuentra ubicado dentro de la región del volcán de Tequila, en el actual estado de Jalisco (fig. 2). Las características geográficas lacustres de la región permitieron un desarrollo cultural de amplio rango, empezando desde el 1000 a. C. hasta la llegada de los españoles.

Si bien el material cultural recuperado es abundante y diverso, el análisis de los fragmentos cerámicos correspondientes a tinajas de gran formato, denominadas tejuineras, es la temática central de la presente investigación. La designación de las tinajas prehispánicas como tejuineras se dio por comparación etnográfica, pues se creía —y se cree— que en dichas tinajas se preparaba la bebida fermentada conocida como tejuino (bebida fermentada elaborada a partir de maíz); acontecimiento que se registra, principalmente, entre los tarahumaras, coras y huicholes de México. En este sentido, fue Phil Weigand quien, tras haber observado el interior de las vasijas, describió un desgaste uniforme de la olla, por lo que infirió su uso en la preparación de tejuino (González *et al.* 2012: 20). Sin embargo, existía la posibilidad de que las tinajas también pudieran servir para otras funciones como la preparación de alimentos, tal como lo analiza Von Winning (1996) en maquetas de cerámica del Occidente (González *et al.* 2012), además de utilizarse como contenedores de agua.

Varios estudios arqueológicos desarrollados en el área de Occidente relativa a la región de los valles de Jalisco (con su eje articulador en el Volcán de Tequila), han mantenido un enfoque en cronologías específicas: la del Formativo al Clásico Temprano (350 a. C. al 450-500 d. C.), partiendo de la llamada Tradición Teuchitlán, además de estudiar sitios determinados como Guachimontones, Loma Alta, Navajas y los nuevos descubrimientos para el periodo Epiclásico (600-900 d. C.) como es el caso de El

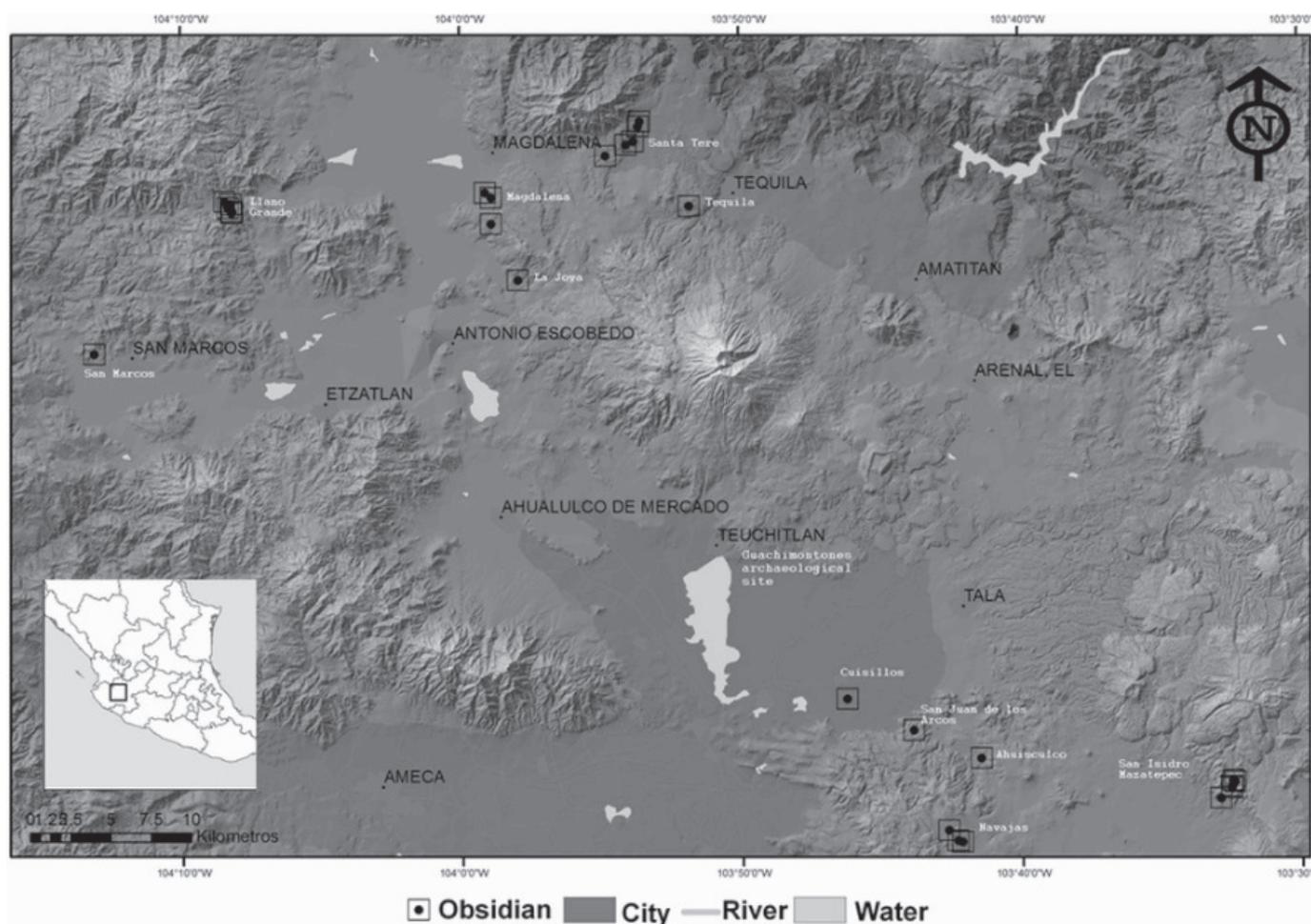


Figura 2. Localización del sitio arqueológico Guachimontones dentro de la región de Tequila, México.

Palacio de Ocomo, La Higuera y San Juanito de Escobedo. Pese a ello, son menos frecuentes los análisis del periodo Posclásico. Por tanto, también son limitadas las respuestas que se han podido dar sobre dicha cronología y, con ello, sobre las tinajas mencionadas.

El objetivo principal de esta investigación consiste en estudiar arqueométricamente las tinajas (tejuineras) procedentes de Los Guachimontones, sector Talleres y, con ello, determinar el uso que desempeñaban dichos artefactos en la zona y su cronología.

## CARACTERIZACIÓN DE TALLERES EN EL SITIO LOS GUACHIMONTONES

Partiendo de la hipótesis de que las tinajas recuperadas en Los Guachimontones sirvieron en su momento para contener bebidas fermentadas, es necesario primeramente contextualizarlas. En este sentido, los datos que se exponen en este apartado matizan el área cultural conocida como Occidente,

la cual corresponde actualmente a la región conformada por los estados de Jalisco, Colima, Nayarit, Sinaloa, Michoacán y Guanajuato (Beekman 2010; Weigand 2005: 9; Cabrero 1995: 10-34). Se trata de un vasto y diverso territorio atravesado por la Sierra Madre Occidental, con espacios favorables para la agricultura (práctica de subsistencia) y la vida (Cabrero 1995: 34), y en el que los vestigios materiales son innumerables. Sin embargo, los estudios de la región no han sido recíprocos a la riqueza cultural y natural manifestada en esta área (Weigand 2005: 9; 2008: 16; Williams 1994: 11; Beekman 2010: 41), aunque en los últimos años dicha concepción está cambiando (Beekman 2010). Es así que en la región del volcán de Tequila, específicamente en el sitio de Guachimontones, se realizaron diferentes etapas de prospección y excavación, en las cuales se reconoció un área interpretada como unidades habitacionales dadas las características estructurales y elementos materiales. Este sector fue denominado como *Talleres 1, 2, 3 y 4* (Esparza 2008) por su cercanía a un taller de obsidiana excavado por Soto (1982). De esta manera, en diferentes zonas de

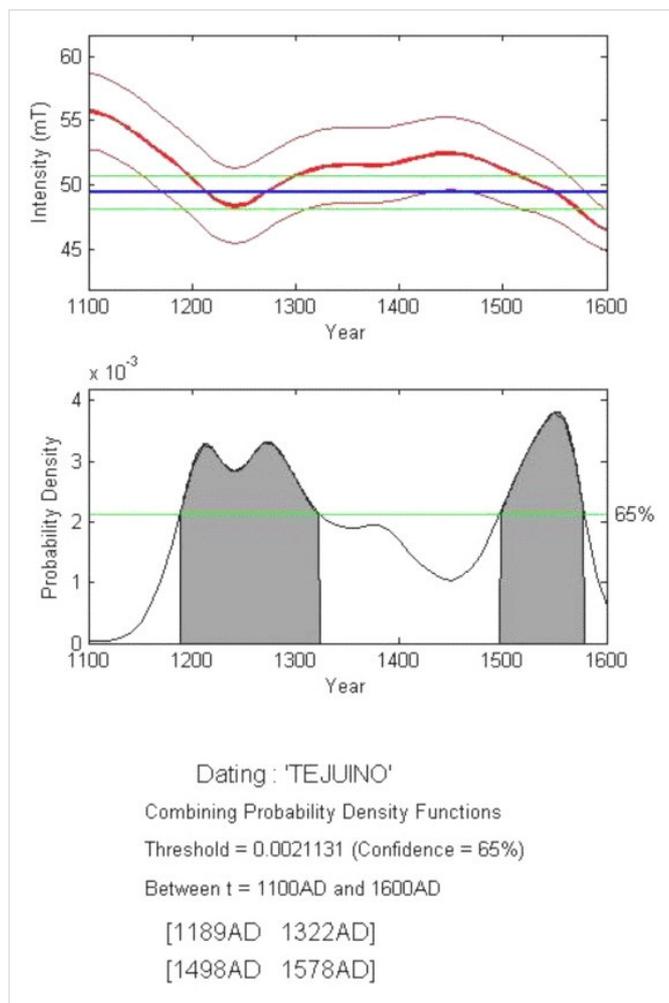


Figura 3. Datación arqueomagnética de una pieza cerámica de la tinaja (tejuinera) recuperada en el área de Talleres del sitio Guachimontones (Jalisco), usando la plataforma de datación SHA14DIF de Pavón-Carrasco *et al.* (2014).

Talleres se localizaron fragmentos de cerámica, entre los que destacan aquellos que pertenecían a tinajas de gran tamaño conocidas como tejuineras; las mismas que estaban dispuestas en diferentes basureros, llegando incluso a recuperarse una tinaja íntegra en la esquina de una habitación, empotrada en el piso (fig. 1).

## ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO

El arqueomagnetismo es un ejemplo de la naturaleza interdisciplinaria de la mayor parte de las investigaciones arqueométricas. Esta requiere tanto de expertos en ciencias de la tierra como en arqueología; los resultados benefician a ambas disciplinas (Aitken 1964). El geofísico puede obtener información acerca de la magnetización de los materiales y del comportamiento del campo geomagnético, mien-

tras que el arqueólogo puede usar el arqueomagnetismo como una herramienta para datar piezas arqueológicas horneadas. La datación arqueomagnética consiste en comparar parámetros magnéticos (dirección e intensidad) de una pieza arqueológica contra un registro conocido de variación geomagnética con el fin de asociar una fecha a la pieza arqueológica que se está estudiando.

En este trabajo se analizaron 8 especímenes provenientes de las piezas de una tinaja del área de Talleres. La intensidad absoluta arqueomagnética fue determinada por medio de la metodología de doble calentamiento de Thellier (1959), modificada por Coe (1967), en las instalaciones del Servicio Arqueomagnético Nacional.

La datación arqueomagnética (edad más probable de la elaboración de la tinaja) de estos fragmentos cerámicos se realizó mediante la determinación de la densidad de probabilidad para la intensidad de campo antiguo por medio de estadística bayesiana, implementada en *Matlab* por Pavón-Carrasco *et al.* (2014). Como curva de referencia se utilizó el modelo global *SHA14DIF* para los últimos 14000 años, calculado para la posición geográfica del sitio de muestreo en cuestión. Este procedimiento arroja dos intervalos: entre 1200 y 1300 años D. C. y entre 1500 y 1580 años D. C. (fig. 3).

## IMPLICACIÓN ARQUEOLÓGICA DE LAS NUEVAS DATACIONES

Una de las cuestiones que rondaba esta investigación era confirmar si estas tinajas correspondían al periodo Posclásico, ya que las unidades habitacionales de Talleres presentan tres periodos de ocupación con un contexto y estratigrafía no muy clara debido al constante uso por la agricultura industrial y, además, por las escasas dataciones que existen para el sitio. La técnica del arqueomagnetismo fue ideal para fechar las tejuineras porque es posible estimar directamente la antigüedad del material cerámico y no de elementos asociados; por lo que esta técnica proporcionaría el veredicto final sobre su relación temporal. Por otro lado, las fuentes históricas no hablan claramente del uso de la bebida del tejuino para la época prehispánica en la región estudiada; por lo que esto podría demostrar que el uso de esta bebida de maíz en la región es más antiguo de lo que se pensaba.

La datación por arqueomagnetismo, como se puede observar, da como resultado intervalos entre

Tabla 1. Relación de las dataciones de C14 y la datación por arqueomagnetismo de la tejuinera.

Lab Sample Number	Sitio	Contexto	Material	Source of Report	C14 Age BP	New Calibration by OxCal
Beta 192088	Guachimontones	Círculo 6, Patio, Entierro 13	Carbón	Beekam y Weigand 2008: Cuadro I	430 ± 40	AD 1430-1486
Beta 192101	Guachimontones	Talleres1, Unidad Habitacional	Carbón	Beekman y Weigand 2008: Cuadro I	430 ± 40	AD 1490
Sample 1	Guachimontones	Talleres 3	Tejuinera			AD 1189-1322 y 1498-1578

1200-1300 d. C. y 1500-1580 d. C, aproximadamente. Estas dataciones se comparan con las únicas dos fechas por <sup>14</sup>C que se tienen del sitio Guachimontones para el periodo Posclásico; una procede del centro ceremonial en una reutilización como unidad habitacional, y otra proviene directamente del área de Talleres 1. Las fechas obtenidas aparecen en la tabla 1.

Como se puede observar en la tabla anterior, las dataciones por arqueomagnetismo son muy similares a las ya publicadas del sitio arqueológico de Guachimontones para el Posclásico; específicamente, la segunda fecha es muy cercana.

Con esta nueva técnica del arqueomagnetismo directo en la cerámica, se pudo comprobar que las tejuineras son parte del periodo Posclásico del sitio Guachimontones, aunado al uso de esta bebida en unidades habitacionales de tamaño modesto. Asimismo, podemos constatar que, por el número de fragmentos de tejuineras, aquella era una bebida que se producía en cada unidad habitacional, haciendo de ella un elemento importante en la cohesión social de esta sociedad posclásica.

## Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada financieramente por el proyecto UNAM-PAPIIT 105214. Agradecemos el apoyo de la Dra. Verenice Heredia, directora del proyecto Teuchitlán.

## Sobre los autores

MIGUEL ÁNGEL NOVILLO ([migangnov@hotmail.com](mailto:migangnov@hotmail.com)) es Licenciado en Historia y Maestro en Arqueología por El Colegio de Michoacán, A. C. Su línea de investigación se centra en el estudio de las bebidas pre-

hispanicas de América. Actualmente realiza investigaciones arqueológicas en la región sur de Ecuador.

RODRIGO ESPARZA LÓPEZ ([resparza@colmich.edu.mx](mailto:resparza@colmich.edu.mx)) es Licenciado y Maestro en Arqueología por la Escuela Nacional de Antropología e Historia. Doctor en Ciencias Sociales por el CIESAS-Occidente, su línea de investigación se basa en el estudio de las sociedades preestatales del Occidente de México y, en especial, del comercio e intercambio de la obsidiana. Actualmente es profesor-investigador del Centro de Estudios Arqueológicos de El Colegio de Michoacán, A. C. ([www.colmich.edu.mx](http://www.colmich.edu.mx)).

AVTO GOGUITCHAICHVILI ([avto@geofisica.unam.mx](mailto:avto@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física por la Universidad Estatal de Tbilisi (República de Georgia), Maestro y Doctor en Geofísica con especialidad en geomagnetismo por la Universidad de Montpellier, Francia. Actualmente es investigador titular del Instituto de Geofísica, Campus Morelia de la UNAM, y corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional ([www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/](http://www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/)).

JUAN MORALES ([jmorales@geofisica.unam.mx](mailto:jmorales@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus líneas de investigación destaca el arqueomagnetismo, con contribuciones importantes tanto en Mesoamérica como en otras partes del mundo. Actualmente es responsable del Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) y corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN).

MIGUEL CERVANTES SOLANO es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus líneas de investigación destaca la variación secular del campo magnético terrestre a diferente escala. Actualmente es profesor-investigador de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Campus Morelia de la UNAM ([miguel\\_cervantes@enesmorelia.unam.mx](mailto:miguel_cervantes@enesmorelia.unam.mx)).

## REFERENCIAS CITADAS

- AITKEN, M. J. 1964. Archaeomagnetic results: some geophysical implications. *Archaeometry* 7/1: 43-46.
- BEEKMAN, C. 2010. Recent Research in Western Mexican Archaeology. *Journal of Archaeological Research* 18: 41-109.
- CABRERO GARCÍA, M. T. 1995. *La muerte en el Occidente prehispánico*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas, México.
- COE, R. S. 1967. The Determination of Paleo-Intensities of the Earth's Magnetic Field with Emphasis on Mechanisms which Could Cause Non-Ideal Behavior in Thellier's Method. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* 19: 157-159.
- ESPARZA, R. 2008. *Informe de excavaciones 2003-2006 en el Complejo Arqueológico Guachimontones. La Tradición Teuchitlán del Occidente de México*. Archivo del Consejo de Arqueología, INAH, México.
- GONZÁLEZ, M. ET AL. 2012. *Informe de Restauración de la pieza Olla Tejuinera*. Escuela de Conservación y Restauración de Occidente, Licenciatura en Restauración de Bienes Muebles, México.
- PAVÓN-CARRASCO, F. J., M. L. OSETE, J. M. TORTA, A. DE SANTIS. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters* 388: 98-109.  
< <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046> >
- SOTO, D. 1982. *Análisis de la tecnología de producción del taller de obsidiana de Guachimontón, Teuchitlán, Jalisco*. Tesis de Licenciatura, ENAH, México.
- THELLIER, E., O. THELLIER. 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annales de Géophysique* 15: 285-376.
- WEIGAND, P.  
— 2005. Introducción. En *El Antiguo Occidente de México. Nuevas Perspectivas sobre el Pasado Prehispánico*, editado por E. Williams et al., pp. 9-24. El Colegio de Michoacán, México.  
— 2008. Introducción. En *Tradición Teuchitlán*, editado por P. Weigand, C. Beekman y R. Esparza, pp. 15-28. El Colegio de Michoacán, Secretaría de Cultura del Estado de Jalisco, México.
- WILLIAMS, E. 1994. El Occidente de México, una perspectiva arqueológica. En *Arqueología del Occidente de México*, editado por E. Williams y R. Novella. El Colegio de Michoacán, México.

## AVANCE DE INVESTIGACIÓN

# DATAACIONES ARQUEOMAGNÉTICAS EN LA CIUDADELA DE TEOTIHUACAN, SIERRA DE LAS NAVAJAS Y XALASCO

*Archaeomagnetic Datings in the Citadel of Teotihuacan, Sierra de las Navajas, and Xalasco*

*Anuar Gabriel Terán Guerrero,<sup>1</sup> Ana María Soler Arechalde,<sup>2,4</sup>  
Avto Goguitchaichvili,<sup>3,4</sup> Cecilia Caballero-Miranda,<sup>2</sup>  
Juan Morales,<sup>3,4</sup> Jaime Urrutia-Fucugauchi<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México; <sup>2</sup> Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica, UNAM, México;

<sup>3</sup> Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA), Instituto de Geofísica, Unidad Morelia, UNAM, México;

<sup>4</sup> Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN), Instituto de Geofísica, UNAM, México



Figura 1. Toma de especímenes y orientación en Pirámide de Quetzalcóatl, Ciudadela, Teotihuacan.

*Recibido: 14-1-2016. Aceptado: 18-1-2016. Publicado: 25-1-2016.*

**RESUMEN.** El control cronoestratigráfico es fundamental para el desarrollo del trabajo arqueológico, por ello el arqueomagnetismo se ha constituido como una gran herramienta para las dataciones. En este trabajo se muestran los resultados de dataciones arqueomagnéticas mediante la determinación de la dirección de magnetización de pisos de estuco de tres sitios de la cultura teotihuacana: Ciudadela de Teotihuacan, Sierra de las Navajas y Xalasco, Tlaxcala. Esta cultura se desarrolló en el centro de México a partir del año 1 d. C., teniendo su mayor esplendor durante los siglos IV al VI d. C. Tres etapas constructivas fueron muestreadas en la ciudadela de Teotihuacan: la preciudadela, la pirámide de Quetzalcóatl y la pirámide adosada. La Sierra de las Navajas en Hidalgo, a 50 km de Teotihuacan, era su principal proveedor de obsidiana, por lo que es de interés conocer sus periodos de ocupación. El motivo del análisis de los pisos de Xalasco, Tlaxcala, sitio de la cultura teotihuacana, es por encontrarse en la ruta de comunicación con la zona del Golfo de México. Utilizando la metodología y el programa de Pavón-Carrasco et al. (2014) se infieren intervalos de tiempo que nos permiten comprender la dinámica ocupacional de estos sitios.

**PALABRAS CLAVE:** datación arqueomagnética, Teotihuacan, estucos, variación secular geomagnética.

**ABSTRACT.** The chronostratigraphic control is fundamental during any archaeological survey. Recent studies over the Americas showed that archaeomagnetism emerges as a great tool for absolute dating purposes. In this paper, we report new archaeomagnetic datings obtained from stucco floors belonging to three sites of Teotihuacan: the Citadel of Teotihuacan, Sierra de las Navajas and Xalasco, Tlaxcala. This culture developed in central Mexico from AD 1, having its greatest splendor during the 4th to 6th centuries AD. Three construction phases were sampled in the citadel of Teotihuacan: the pre-Citadel, the Pyramid of Quetzalcoatl and the terraced pyramid. The Sierra de la Navajas in Hidalgo, located 50 km from Teotihuacan, was its main supplier of obsidian. The main interest of Xalasco, Tlaxcala is that it is located on the way to the Gulf of Mexico. The use of methodology developed by Pavón-Carrasco et al. (2014) allowed to define time intervals which help to understand the occupational dynamics of these sites. **KEYWORDS:** archaeomagnetic dating, Teotihuacan, stuccos, geomagnetic secular variation.

## INTRODUCCIÓN

Teotihuacan fue una de las ciudades más grandes de Mesoamérica y sus primeras etapas constructivas se datan entre el año 1 y 150 d. C, que corresponde a las primeras etapas de la Ciudadela y el Templo de Quetzalcóatl (Gazzola 2009). Un evento que marca la evolución de la ciudad fue la construcción de la pirámide denominada adosada sobre el templo de Quetzalcóatl; el cual fue primero quemado como parte de un ritual que supone la expulsión del grupo que seguía a este dios y su probable llegada a Tikal, en Guatemala, a 1250 km de distancia (Fahsen 2000). El área de la Ciudadela también muestra afectaciones del Gran Incendio de 550 ± 25 d. C. Estos hechos permiten, mediante el arqueomagnetismo, realizar una secuencia cronoestratigráfica y compararla con dataciones de radiocarbono disponibles.

La economía de la gran urbe de Teotihuacan se propone sustentada de manera muy importante por el control de la obsidiana, siendo uno de sus mayores proveedores la Sierra de las Navajas, a una distancia de 50 km. El asentamiento en este sitio suponía campamentos temporales, pero se han encontrado al menos dos conjuntos habitacionales con arquitectura teotihuacana (Pastrana y Domínguez 2009), de donde provienen las muestras estudiadas y de ahí la importancia de conocer su cronología.

Por último, las caravanas del Golfo de México hacia Teotihuacan eran de gran importancia para los suministros de la gran urbe. La ruta del Golfo constaba de sitios de paso como Xalasco, en el estado de Tlaxcala, al oriente de la Cuenca de México, que muestra vestigios y entierros humanos característicos del periodo Clásico teotihuacano (Manzanilla 2011). La importancia de determinar sus etapas de ocupación es fundamental para comprender el desarrollo y funcionamiento de esta gran metrópoli como también su caída.

## MUESTREO

En el área de la ciudadela de Teotihuacan se extrajeron 5 muestras (diciembre de 2005): CEE1, CEE2, CQE1, CQE2, CQE3; las cuales corresponden al conjunto E (CE) y al templo de Quetzalcóatl (CQ). De ellas se obtuvieron un total de 59 especímenes, cada uno orientado independientemente. También se analizó una muestra de 2 bloques (PC1



Figura 2. Toma de muestras en Xalasco, Tlaxcala. Adhesión de testigos de madera con pegamento epóxico. Orientación con brújula magnética Brunton. Obtención de testigos con herramientas no magnéticas. Muestras de bloque orientadas con brújula Brunton.

y PC2) correspondiente a la etapa Preciudadela, que fue provista por la Dra. Julie Gazzola del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), de la cual se obtuvieron 24 especímenes.

En la Sierra de las Navajas, en diciembre de 2006, se extrajeron 4 muestras (SN: E1, E2, E3, E4), de las que se obtuvieron 34 especímenes, cada uno orientado independientemente.

En Xalasco, Tlaxcala, en diciembre de 2008, se extrajeron cinco muestras: XAL 3 con 11 especímenes orientados independientemente y cuatro muestras de bloque (XAL 4, XAL 5, XAL 6 y XAL 7), de las que se obtuvieron 49 especímenes.

Los especímenes se obtienen al adherir testigos cilíndricos de madera directamente sobre la superficie a muestrear y antes de ser extraídos se orientan cada uno con una brújula Brunton y se etiquetan (fig. 1). En el caso de las muestras de bloque, se orienta una de las superficies de la muestra con una brújula Brunton y posteriormente, en el labora-

torio, le son adheridos los testigos de madera, y a cada uno de ellos se le transfiere la marca del bloque y se etiquetan. Cada espécimen tiene un diámetro de 2.54 por 2.1 cm de alto. Para la adhesión de los testigos se emplea resina epóxica libre de elementos magnéticos (fig. 2).

## MÉTODOS DE PROCESAMIENTO

Con el fin de obtener la magnetización de cada espécimen, se realizó en el laboratorio un lavado magnético con campos alternos crecientes con equipo de marca MOLSPIN, con el fin de eliminar algunas magnetizaciones espurias. Después de cada incremento del campo, la muestra fue medida en un magnetómetro JR6 para así poder determinar la dirección de la magnetización característica del espécimen y, de ahí, inferir la dirección del campo magnético presente en el momento que se desea datar.

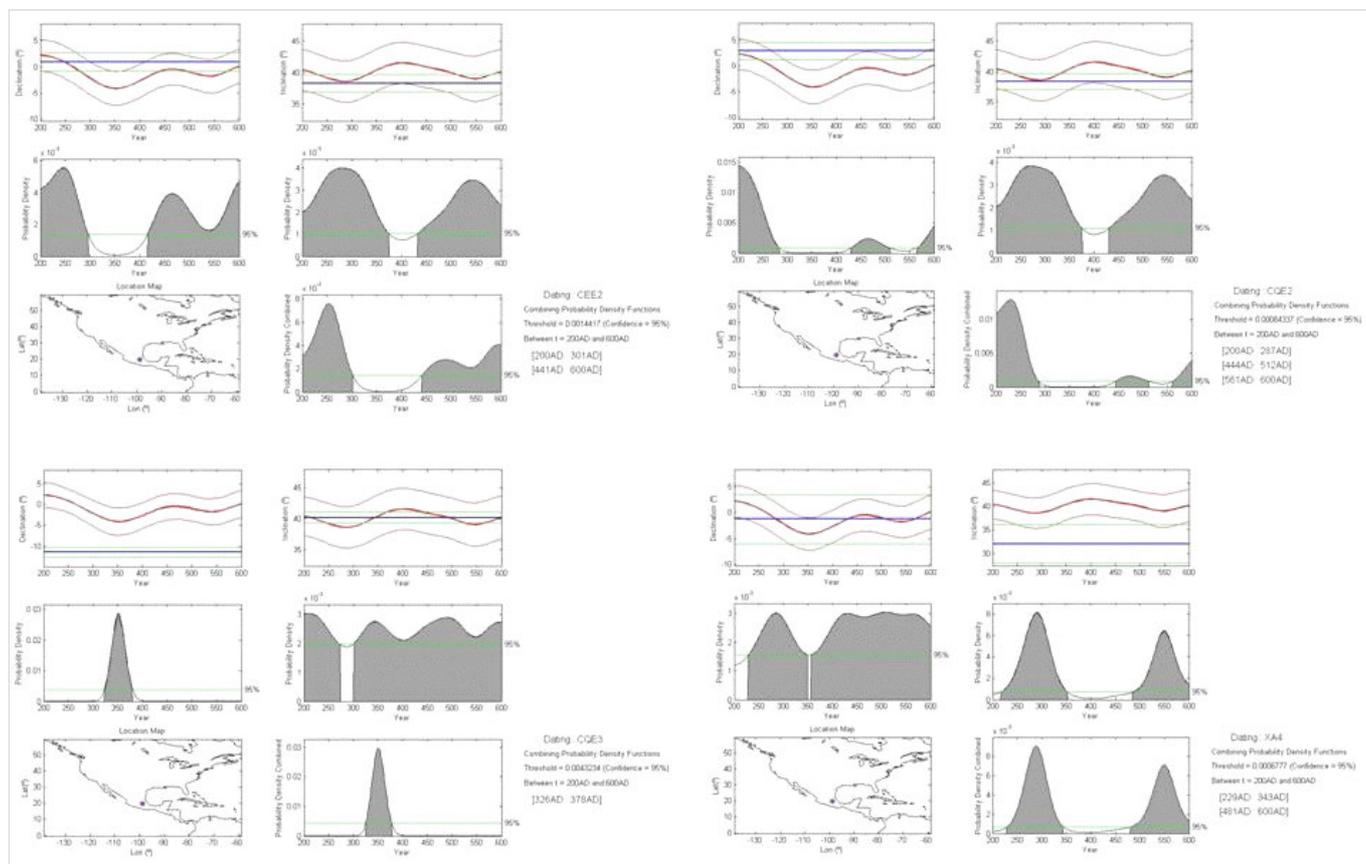


Figura 3. Datación con el programa de Pavón-Carrasco *et al.* (2014). Muestras CEE2, CQE2, CQE3 y XAL4.

Para el caso de las muestras no quemadas, la magnetización es adquirida al momento de fraguarse el estuco y, en el caso de muestras quemadas, dicha magnetización corresponde a la de la última exposición al fuego del material. En ambos casos se graba el campo presente en dicho momento.

Una vez obtenidas las direcciones de cada espécimen, se aplicó la estadística Fisher para obtener la dirección media por muestra. Se obtuvieron datos de declinación e inclinación de magnetización. La declinación corresponde al ángulo que forma la componente de la magnetización sobre el plano horizontal con el norte geográfico; la inclinación es el ángulo vertical que forma la magnetización con el plano horizontal. El  $\alpha_{95}$  es un parámetro estadístico de la incertidumbre de las mediciones; corresponde con un ángulo cuyos valores menores a  $10^\circ$  indican una buena concentración. Los parámetros  $r$  y  $k$  son de agrupamiento; cuanto más cercano esté  $r$  del número de especímenes y más alto sea  $k$ , mejores son los resultados. La datación se efectuó utilizando el programa Pavón-Carrasco *et al.* (2014) (fig. 3). También se realizaron pruebas de magnetismo de roca para una mayor confiabilidad en la determinación de la magnetización.

## RESULTADOS

Los resultados de las dataciones se muestran en la tabla 1, en donde  $n$  es el número de especímenes que intervinieron en los cálculos, y  $N$  es el número de especímenes medidos;  $q$  indica piso quemado y  $nq$  indica piso no quemado. Además de los datos de la dirección de magnetización, se anexa la información de datación arqueomagnética. Las dataciones son señaladas como probables, en virtud de la naturaleza del campo, ya que puede existir más de una coincidencia de la dirección del campo con el tiempo que le corresponde, de ahí la importancia del estricto control estratigráfico por parte del arqueólogo; por ello, y como criterio de selección, se incluye en la tabla la cronología arqueológica esperada. *Para fines de datación solo se aceptaron resultados con  $\alpha_{95}$  menores a  $10^\circ$ ; las muestras en las que se lee "Sin resultado" corresponden a muestras con  $\alpha_{95}$  mayor a  $10^\circ$ .*

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se obtuvieron 10 dataciones que corresponden a los periodos de ocupación de las áreas estudiadas,

Tabla 1. Resultados de las dataciones.

<b>Tabla 1</b>								
<b>Muestra</b>	<b>n/N</b>	<b>Dec</b>	<b>Inc</b>	<b>a<sub>95</sub></b>	<b>K</b>	<b>r</b>	<b>Fechas probables</b>	<b>Cronología Arqueológica Esperada</b>
<b>Ciudadela</b>								
CQE1(q)	9/10	359.0	37.6	3.9	174.4	9.0	[384-440]	Quema de pirámide y expulsión del Grupo militar y posible llegada de teotihuacanos a Tikal 379-439 d.C.
CQE2(q)	10/10	2.9	38.4	2.6	353.5	10.0	[397-440]	Quema de pirámide y expulsión del Grupo militar y posible llegada de teotihuacanos a Tikal 379-439 d.C.
CQE3(nq)	15/18	348.5	40.2	1.7	546.4	15.0	[324-386]	Construcción del Templo de Quetzalcóatl 325-350 d.C.
CEE1(nq)	10/11	359.0	38.0		MAD=16.5		Sin resultado	Construcción del Conjunto 325-350 d.C.
CEE2(q)	9/9	1.0	38.3	2.8	332.2	9.0	[435-600]	Gran Incendio 575 +/- 25
PC 1y 2 (nq)	21/24	3.0	39.0		MAD=13.8		Sin resultado	Etapas previas de Construcción de la Ciudadela
<b>Sierra de las Navajas</b>								
SNE1(q)	5/9	353.3	27.0	9.6	39.02	4.9	[469-540]	Xolalpan tardío 460-545 d.C.
SNE2(q)	6/8	9.6	34.4	8.7	37.05	5.9	[330-342] [391-550]	Xolalpan 325-550 d.C.
SNE3y E4(q)	13/16	356.0	40.0		MAD=13.4		Sin resultado	Tlalmimilolpa 200-270 d.C.
<b>Xalasco</b>								
Xa3(q y nq)	11/11	350.7	37.6	9.1	16.81	10.4	[100 aC 33] [158-170] [205-600]	Más joven a 690 d.C.
Xa4(nq)	6/14	358.8	32.0	8.2	41.99	5.9	[330-393] [399-410]	Xolalpan temprano 325-415 d.C.
Xa6(nq)	2/2						Sin resultado	
Xa7(q)	8/9	341.3	28.5	9.6	21.29	7.7	[540-589] [651-720]	<sup>14</sup> C(540-720) d.C.

lo que implica un 77 % de las muestras estudiadas. Los estudios arqueomagnéticos nos permiten también aportar información sobre la dinámica ocupacional. Los resultados de la Ciudadela describen su evolución, sus primeras etapas constructivas, la construcción de la Pirámide de Quetzalcóatl, su quema que corresponde a un ritual de expulsión. La datación de la quema permite inferir la posibilidad de la llegada del grupo expulsado hasta Tikal, Guatemala, como lo muestran algunos murales. También

se determina, tanto en la Ciudadela como en Xalasco, el ritual del gran incendio de Teotihuacan, lo que lo hace un evento de tipo regional.

La datación más tardía para Xalasco podría llevarnos a inferir que el sitio continuó ocupándose aún después de la caída de Teotihuacan. El presente trabajo es un importante aporte al conocimiento del campo magnético presente en el centro de México durante la época teotihuacana. Los datos, acompañados de otros métodos de datación como radiocar-

bono o termoluminiscencia, podrán ser incluidos para el mejoramiento de las curvas de variación secular, tanto a nivel local como mundial.

## Agradecimientos

AG agradece el apoyo del proyecto UNAM-PAPIIT IN105124. AMS y AG agradecen a la Dra. Linda R. Manzanilla N., la Dra. Julie Gazzola y el Dr. Alejandro Pastrana las facilidades para la toma y estudio de las muestras reportadas.

## Sobre los autores

ANUAR GABRIEL TERÁN GUERRERO es Físico con Maestría en Ciencias de la Tierra por la UNAM y estudiante de Doctorado en el área de Arqueomagnetismo en el LIMNA de Michoacán. Correo electrónico: [anuarteran@ciencias.unam.mx](mailto:anuarteran@ciencias.unam.mx).

ANA MARÍA SOLER ARECHALDE es Física con Maestría y Doctorado en Sismología y Física del Interior de la Tierra por la UNAM. Lleva más de 10 años trabajando sobre el arqueomagnetismo de México, en particular en datos direccionales dentro del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Ciudad Universitaria, UNAM. También es corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional. Correo electrónico: [anesoler@geofisica.unam.mx](mailto:anesoler@geofisica.unam.mx).

AVTO GOGUITCHACHVILI ([avto@geofisica.unam.mx](mailto:avto@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física por la Universidad Estatal de Tbilisi (República de Georgia), Maestro y Doctor en Geofísica con especialidad en geomagnetismo por la Universidad de Montpellier, Francia. Actualmente es Investigador Titular del Instituto de Geofísica, Campus Morelia de la UNAM, y corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional ([www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/](http://www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/)).

CECILIA CABALLERO MIRANDA es Ingeniera Geóloga con Maestría en Geología por la Facultad de Ciencias y Doctora en Ciencias de la Tierra por la UNAM, con especialidad en anisotropía de susceptibilidad magnética. Trabaja en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Ciudad Universitaria, UNAM. Correo electrónico: [cecilia@geofisica.unam.mx](mailto:cecilia@geofisica.unam.mx).

JUAN MORALES ([jmorales@geofisica.unam.mx](mailto:jmorales@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus líneas de investigación destaca el arqueomagnetismo, con contribuciones importantes tanto en Mesoamérica como en otras partes del mundo.

Actualmente es responsable del Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) y corresponsable del recién creado Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN).

JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI es Ingeniero Geofísico y Maestro en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México. Se doctoró en la Escuela de Física de la Universidad de Newcastle upon Tyne, Inglaterra. Áreas de interés: paleomagnetismo, exploración geofísica, tectónica, paleoclimas, meteoritos y cráteres de impacto. Es Investigador Titular en el Instituto de Geofísica de la UNAM. Correo electrónico: [juf@geofisica.unam.mx](mailto:juf@geofisica.unam.mx).

## REFERENCIAS

- FAHSEN, F. 2000. Kaminaljuyu y sus vecinos. En *XIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala (1999)*, editado por J. P. Laporte, H. Escobedo, B. Arroyo y A. C. de Suasnávar, pp.42-65. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala. URL: < [http://www.asociaciontikal.com/pdf/04.99\\_-\\_Federico\\_Fahsen.pdf](http://www.asociaciontikal.com/pdf/04.99_-_Federico_Fahsen.pdf) >.
- GAZZOLA, J. 2009. Características arquitectónicas de algunas construcciones de fases tempranas en Teotihuacán. *Arqueología* 42: 216-233. INAH.
- MANZANILLA, L. R. 2011. Sistemas de control de mano de obra y del intercambio de bienes suntuarios en el corredor teotihuacano hacia la costa del Golfo en el Clásico. *Anales de Antropología* 45: 9-32. IIA, UNAM.
- PASTRANA, A., S. DOMÍNGUEZ. 2009. Cambios en la estrategia de la explotación de la obsidiana de Pachuca: Teotihuacan, Tula y Triple Alianza. *Ancient Mesoamerica* 20/1: 129-148.
- PAVÓN-CARRASCO, F. J., M. L. OSETE, J. M. TORTA, A. DE SANTIS. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters* 388: 98-109. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046> >.
- SOLER-ARECHALDE, A. M., F. SÁNCHEZ, M. RODRÍGUEZ, C. CABALLERO-MIRANDA, A. GOGUITCHACHVILI, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, L. MANZANILLA, D. H. TARLING. 2006. Archaeomagnetic investigation of oriented pre-Columbian lime-plasters from Teotihuacan, Mesoamerica. *Earth, Planets and Space* 58/10: 1433-1439. < <http://link.springer.com/article/10.1186%2FBF03352639> >

## AVANCE DE INVESTIGACIÓN

# REVALUACIÓN DE LA CRONOLOGÍA DE ERUPCIONES DEL VOLCÁN VESUBIO (ITALIA) A PARTIR DE 79 A. D.

## *Reassessment of the Eruptive Chronology of Italy's Vesuvius Volcano from AD 79 to 1906*

*Jaime Urrutia-Fucugauchi,\* Avto Goguitchaichvili,\*\*  
Ligia Pérez-Cruz,\* Juan Morales\*\**

\* Departamento de Geomagnetismo y Exploración, Instituto de Geofísica, UNAM, México;

\*\* Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN), Instituto de Geofísica, UNAM, México



Figura 1. Vista del volcán Vesubio desde el sitio arqueológico de Herculano, que fue sepultado por flujo piroclástico y cenizas durante la erupción de 79 A. D.

**RESUMEN.** El volcán Vesubio se caracteriza por numerosas erupciones, separadas por periodos de baja actividad, en un área densamente poblada que incluye los centros de Pompeya y Herculano y, ac-

*Recibido: 20-1-2016. Aceptado: 27-1-2016. Publicado: 3-2-2016.*

tualmente, Nápoles. Los estudios vulcanológicos y arqueológicos han requerido, entre otros datos y observaciones, determinar la frecuencia y la naturaleza efusiva o explosiva de las erupciones empleando técnicas de datación y la construcción de una cronología de alta resolución. En este estudio se analizan 14 flujos de eventos eruptivos en el periodo de 79 a 1906 A. D., para los cuales presentamos nuevas dataciones arqueomagnéticas usando el modelo geomagnético SHA.DIF.14k. Las direcciones paleomagnéticas de los flujos se correlacionan con la curva de variación secular, permitiendo reevaluar la cronología eruptiva del Vesubio.

**PALABRAS CLAVE:** *arqueomagnetismo, volcán Vesubio, curva de variación secular geomagnética, cronología eruptiva.*

**ABSTRACT.** *Vesuvius Volcano, located in a densely populated area including the cities of Pompeii, Herculaneum and now Naples, is characterized by numerous eruptions separated by periods of quiescence. Information on the frequency and nature of this activity is critical for both volcanological and archaeological studies. Dating techniques in tandem with historical records can provide a high resolution chronology for Vesuvius' eruption history. In this study, we analyze paleomagnetic data from 14 lava flows dating between AD 79 to 1906 using the recently developed SHA.DIF.14k geomagnetic model. We correlate the paleomagnetic directions of the flows with a new secular variation curve, resulting in a reassessment of the eruptive chronology of Vesuvius.*

**KEYWORDS:** *Archaeomagnetism, Vesuvius Volcano, secular variation curve, eruptive chronology.*

## INTRODUCCIÓN

El Vesubio se ha caracterizado por numerosas erupciones, separadas por periodos de inactividad, en un área densamente poblada que actualmente incluye la ciudad de Nápoles. La erupción del volcán Vesubio en el 79 A. D. afectó a un área extensa, cubriendo los centros de Pompeya y Herculano (fig. 1; Arnó *et al.* 1987; Giacomelli *et al.* 2003). La cubierta de flujos piroclásticos y las cenizas permitieron la preservación de registros arqueológicos, cuyo estudio ha requerido integrar diferentes métodos y especialistas. Los estudios han requerido, en-

tre otros datos y observaciones, determinar la frecuencia y naturaleza efusiva o explosiva de las erupciones, para lo que se han empleado varias técnicas de datación como radiocarbono, hidratación de obsidianas, Ar/Ar y trazas de fisión. Unas de las limitaciones en la construcción de cronologías de alta resolución han sido las incertidumbres analíticas asociadas, lo que ha generado interés en el uso de alternativas como la datación arqueomagnética. Esta técnica aprovecha la variación secular del campo geomagnético y los sistemas de registro de materiales arqueológicos y naturales, determinando la dirección de la magnetización en rocas volcánicas, cerámicas y materiales quemados; y correlacionando estos datos con una curva de referencia. Las incertidumbres en los métodos arqueomagnéticos conjuntan las relacionadas con el registro y medición de la magnetización y la resolución de la curva. En los últimos años se ha invertido considerable esfuerzo en determinar curvas de referencia con alta resolución en diferentes regiones. Con estos nuevos desarrollos se tiene la necesidad de reevaluar estudios anteriores, en particular aquellos en que se tienen inconsistencias y baja precisión y la posibilidad de fechar otros elementos no investigados previamente. Este es el caso de la cronología eruptiva del volcán Vesubio que se analiza en este trabajo.

## LA CONTROVERSIA

Somma-Vesubio es uno de los complejos volcánicos con alto riesgo en el sur de Italia, caracterizado principalmente por actividad explosiva con flujos piroclásticos producto de erupciones plinianas. Su historia eruptiva ha sido documentada a partir de registros históricos desde el 79 A. D. Teniendo en cuenta la proximidad a zonas urbanas densamente pobladas alrededor del complejo, esta es una región que requiere evaluaciones de los niveles de riesgo (probabilidad de ocurrencia de desastres en escalas espacio-temporales de alta resolución; Ismail-Zadeh *et al.* 2014). Varios estudios se han enfocado a caracterizar los eventos volcánicos y determinar la secuencia de erupciones, pero aún persisten desacuerdos referentes a la cronología eruptiva y naturaleza de las erupciones. Por ejemplo, la «gran erupción» de 1631 A. D. ha sido considerada por Le Hon (1865) como el principal evento explosivo y efusivo en tiempos históricos. Esta propuesta es apoyada en trabajos subsecuentes de Burri y Di Girolamo (1975) y Rolandi y Russo (1993). En contraste,

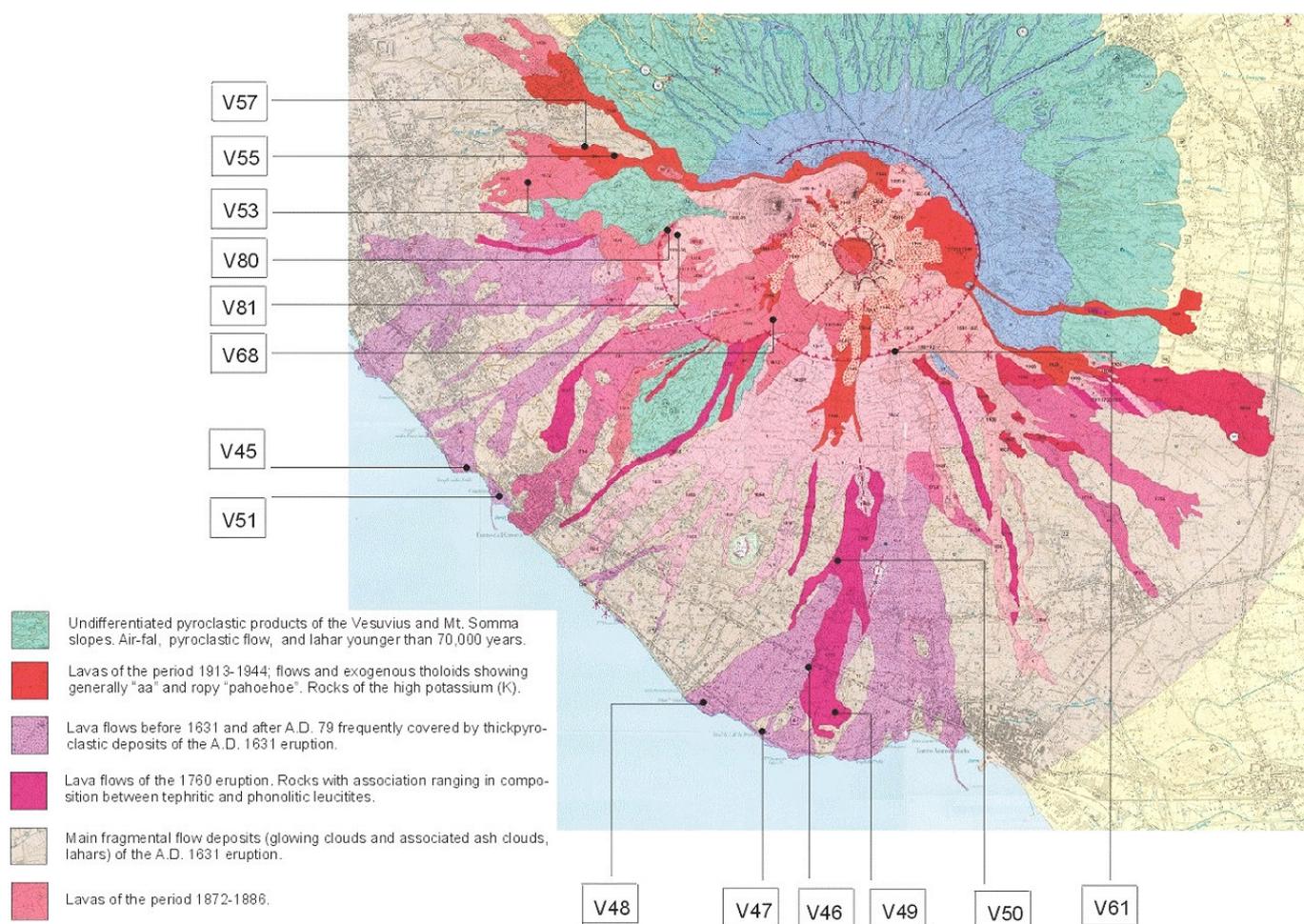


Figura 2. Mapa geológico simplificado del complejo volcánico Somma-Vesubio. La localización de los flujos de lava investigados es indicada por los círculos negros y la identificación del sitio.

otros estudios de Rosi y Santacroce (1986) y Arnó *et al.* (1987) consideran esta erupción de carácter explosivo —es decir, sin lavas— y atribuyen las lavas asociadas al evento de 1631 a erupciones anteriores que se produjeron entre el 968 y 1037 A. D.

El caso del evento de 1631 A. D. no es la única erupción en la controversia; hay varias unidades volcánicas sin fechar o con incertidumbre en su edad, algunas de las cuales son identificadas en el mapa geológico del complejo volcánico Somma-Vesubio (fig. 2).

## TRABAJO PREVIO

Conte-Fasano *et al.* (2006a) estudiaron las direcciones de magnetización remanente y propiedades magnéticas de 14 flujos de lava (fig. 2) de edad desconocida. En el estudio, los datos paleomagnéticos de diez flujos fueron correlacionados con el segmento inicial de la curva de variación secular italiana del siglo XVII, lo que permitió estimar las edades de las erupciones. Los resultados para los otros cuatro si-

tios dieron direcciones medias distintas que no pudieron ser correlacionadas con sectores de la curva de referencia, dentro de los posibles periodos de actividad del volcán. Conte-Fasano *et al.* (2006a, 2006b) propusieron que 3, y posiblemente hasta 11, de los flujos estudiados se correlacionan con el segmento de la curva correspondiente al siglo XVII y podrían corresponder a la erupción de 1631 A. D., dentro de las incertidumbres asociadas (tabla 1). Los resultados apoyan que este evento se puede considerar como una erupción explosiva-efusiva. Análisis de registros históricos de Guidoboni y Boschi (2006) han indicado posible actividad efusiva unos 60 años antes de la erupción de 1631 A. D., lo que abre interpretaciones alternas a evaluar en la correlación con la curva de variación secular.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Como la mayoría de los materiales volcánicos y arqueológicos contienen partículas magnéticas, es-

Tabla 1. Datos arqueomagnéticos y cronología revisada.

Sitio	Edad Estimada	n/N	Dec (°)	Inc (°)	$\alpha_{95}$ (°)	k	Este Estudio
	Conte (2006)						A.D.
V-45	1631	7/9	7.4	66.7	2.4	611	(718-835),(1609-1651)
V-47	1631	9/13	11.5	61.6	1.5	1124	(823-896),(1463-1614)
V-48	1631	10/15	13.8	65.1	2.6	340	(751-885),(1539-1632)
V-51	1631	11/12	15.9	64.6	0.7	3863	(824-910),(1549-1634)
V-46	1760	9/13	341.7	62.6	1.6	1085	1758-1768
V-49	1760	9/16	347.5	63.3	1.3	1569	1731-1768
V-50	1760	9/15	344.0	61.4	2.5	409	1757-1822
V-53	1872	11/15	348.5	56.4	0.9	2320	1864-1888
V-55	1872	8/12	347.6	54.4	1	2950	1861-1882
V-57	1872	11/13	347.5	57.6	1.1	1750	1844-1870
V-80	1858	11/13	345.3	56.0	1.7	725	1843-1882
V-61	1906	7/12	357.5	52.5	0.9	4306	111-390
V-68	1872/1886	8/12	345.2	59.2	1.9	862	1800-1847
V-81	1858/1895	9/12	347.9	59.8	1.1	2044	1806-1841

tos pueden ser empleados en diversos estudios. Una de las principales propiedades es que estos materiales pueden adquirir una remanencia a un tiempo específico. Como el campo geomagnético cambia en dirección e intensidad con el tiempo (variaciones seculares), el momento de adquisición de la magnetización remanente puede determinarse mediante la comparación de estos parámetros con los registros del campo geomagnético en localidades específicas. Cuando las variaciones del campo han sido bien establecidas, la datación arqueomagnética tiene resolución comparable a los métodos de datación radiométrica.

La actividad del volcán Vesubio ha sido registrada a partir de la erupción pliniana del 79 A. D. (Arnó *et al.* 1987; Giacomelli *et al.* 2003). Se han reporta-

do resultados arqueomagnéticos en varios estudios (Incoronato *et al.* 2002; Principe *et al.* 2004), que han permitido ampliar la cronología e investigar la naturaleza efusiva o explosiva de los eventos. Este aspecto de la actividad efusiva y alcance de los flujos ha sido particularmente difícil de establecer y es ejemplificado en la cartografía geológica y en las excavaciones (fig. 2). La discusión abarca erupciones con observaciones directas y periodos de inactividad como el que antecede a 1631 A. D. (Rosi y Santacroce 1986; Guidoboni y Boschi 2006).

En este estudio reportamos nuevas dataciones arqueomagnéticas usando el modelo geomagnético SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco *et al.* 2014), considerado de mayor resolución en la variación del campo geomagnético en los últimos 14.000 años

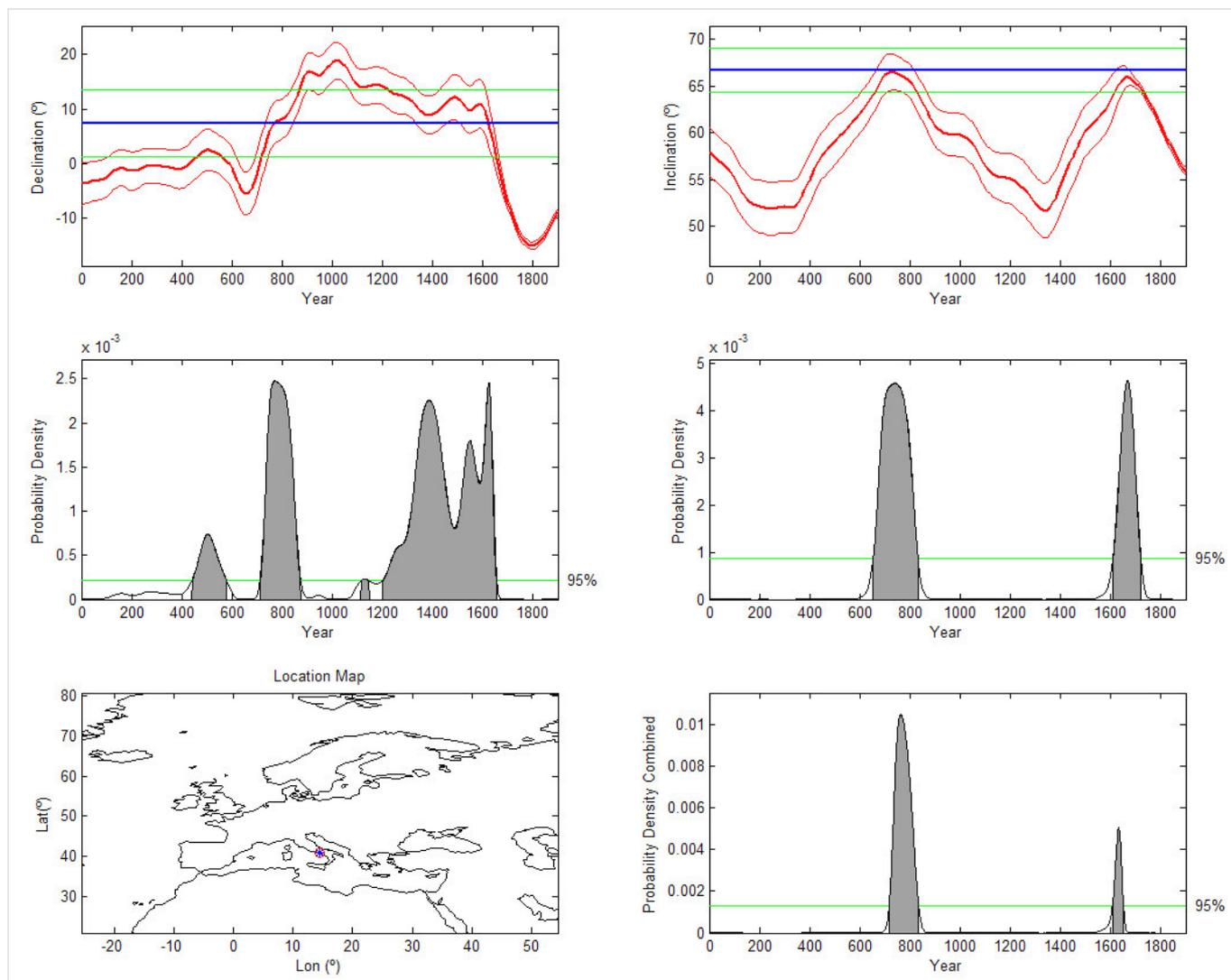


Figura 3. Resultado de la datación arqueomagnética del flujo de lava V-45 (ver tabla 1 y fig. 2): a) curvas maestras con las bandas de incertidumbre asociadas de declinación e inclinación (en rojo) y los datos arqueomagnéticos analizados (en azul) en función del tiempo (en años A. D.); las líneas en verde claro indican los niveles de corte al nivel de probabilidad asignado; b) determinaciones de la densidad de probabilidad en los segmentos correspondientes a la correlación con la curva de variación secular; c) mapa esquemático con la localización del sitio y la gráfica de densidad de probabilidad combinada de declinación e inclinación.

para la región europea. El modelo se construye en la distribución espacial de datos de la base GEOMAGIA50v2 por análisis de armónicos esféricos y temporalmente con *splines*, y ha sido evaluado con los modelos global y europeo. El modelo muestra que el campo geomagnético en los últimos 2000 años se ajusta a un dipolo axial, con un error de 5°.

Entre las implicaciones para los estudios arqueomagnéticos, resalta la necesidad de evaluar los datos obtenidos con curvas de referencias anteriores. Los resultados derivados de las nuevas dataciones y las estimaciones previas de Conte-Fasano *et al.* (2006a) se reportan en la tabla 1. En las figuras 3 y 4 se muestran las correlaciones de los datos paleomagnéticos (declinación e inclinación) con el

modelo geomagnético, que cuantifican las edades de los flujos.

## CONCLUSIONES

El análisis con el modelo SHA.DIF.14k de las edades obtenidas con las estimaciones reportadas previamente permite concluir lo siguiente:

1. La correlación de las direcciones paleomagnéticas para los flujos de lava previamente asociados a la erupción de 1631 A. D. no es confirmada usando la curva de variación secular de Pavón-Carrasco *et al.* (2014). Las nuevas estimaciones, que requieren de análisis y estudios adicionales, sugieren tanto el intervalo entre ~1600 y 1650 A. D. como entre ~800 y 1000 A. D.

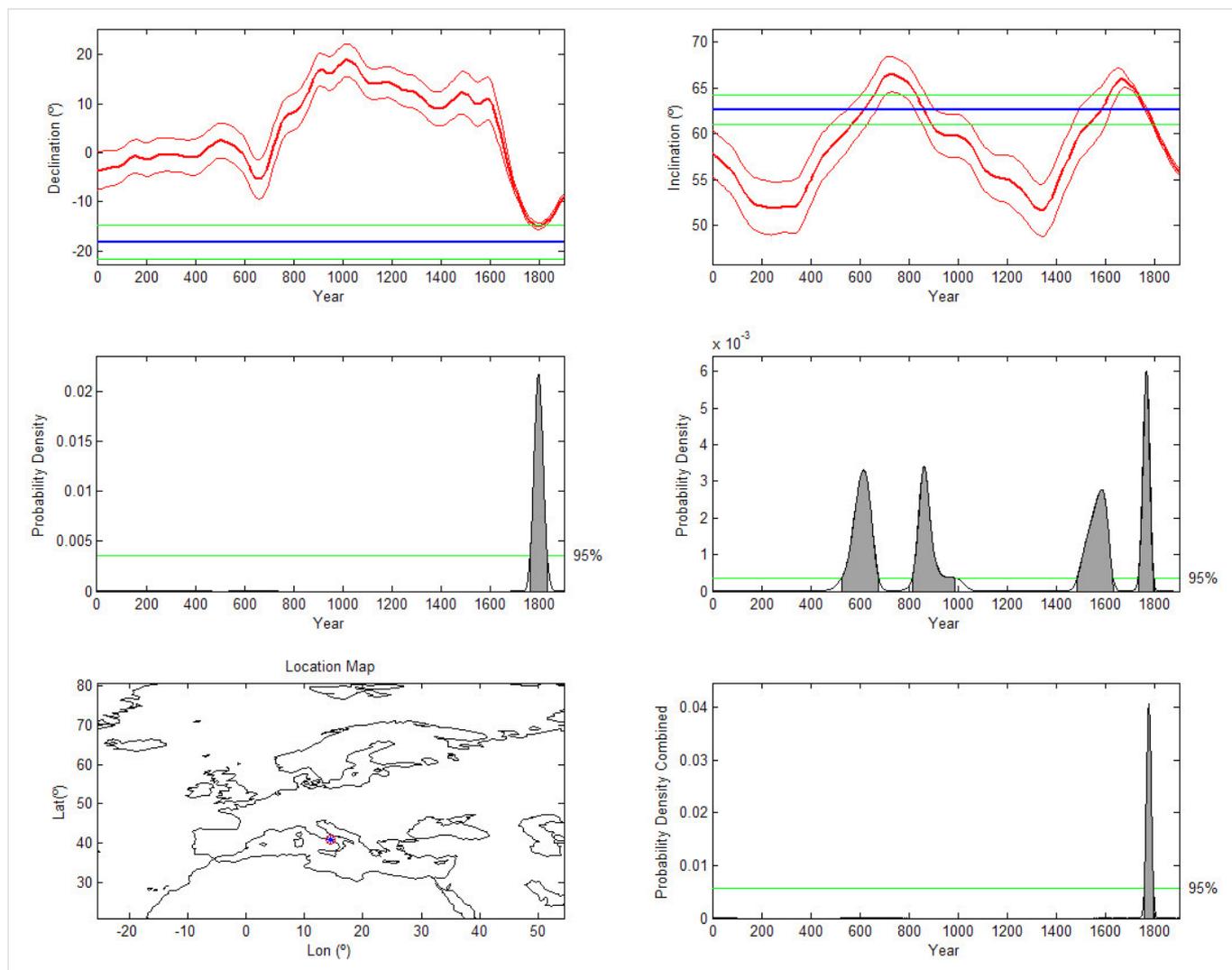


Figura 4. Resultado de la datación arqueomagnética del flujo de lava V-46 (ver tabla 1 y fig. 2).

2. La correlación de las direcciones paleomagnéticas de las lavas de las erupciones de 1760 y 1872 A. D. es confirmada con los análisis usando la nueva curva de variación secular. Estos flujos se corresponden con los intervalos propuestos.

3. La lava atribuida a la erupción de 1906 A. D. podría corresponder a un evento efusivo anterior, posiblemente entre ~111 y 390 A. D.

4. Los resultados ilustran las incertidumbres asociadas a la datación arqueomagnética y la necesidad de integrar análisis cuantitativos e información de otras técnicas.

## Sobre los autores

JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI es Ingeniero Geofísico y Maestro en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México. Se doctoró en la Escuela de

Física de la Universidad de Newcastle upon Tyne, Inglaterra. Áreas de interés: paleomagnetismo, exploración geofísica, tectónica, paleoclimas, meteoritos y cráteres de impacto. Es Investigador Titular en el Instituto de Geofísica de la UNAM. Correo electrónico: juf@geofisica.unam.mx.

AVTO GOGUITCHAICHVILI (avto@geofisica.unam.mx) es Licenciado en Física por la Universidad Estatal de Tbilisi (República de Georgia), Maestro y Doctor en Geofísica con especialidad en geomagnetismo por la Universidad de Montpellier, Francia. Actualmente es Investigador Titular del Instituto de Geofísica, Campus Morelia de la UNAM, y corresponsable del Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN): < <http://www.geofisica.unam.mx/michoacan/san/> >.

LIGIA PÉREZ CRUZ (perezcruz@geofisica.unam.mx) es Bióloga con Maestría y Doctorado en Oceanografía Geológica por la UNAM. Actualmente es Investigador Titular y Jefe del Departamento de

*Geomagnetismo y Exploración Geofísica de la UNAM. Áreas de interés: paleoceanografía, paleoclimas, geoquímica, magnetismo, micropaleontología y geoquímica.*

JUAN MORALES (*jmorales@geofisica.unam.mx*) es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus líneas de investigación destaca el arqueomagnetismo, con contribuciones importantes tanto en Mesoamérica como en otras partes del mundo. Actualmente es responsable del Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) y responsable del Servicio Arqueomagnético Nacional.

## REFERENCIAS CITADAS

- ARNÓ, V., C. PRINCIPE, M. ROSI, R. SANTACROCE, A. SBRANA, M. F. SHERIDAN. 1987. Eruptive history. En *Somma-Vesuvius*, editado por R. Santacroce, pp. 53-103. *CNR Quaderni de La Ricerca Scientifica* 114.
- BURRI, C., P. DI GIROLAMO. 1975. Contributo alla conoscenza delle lave della grande eruzione del Vesuvio del 1631. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia (Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.)* 30: 705-739.
- CONTE-FASANO, G., J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, A. GOGUITCHAICHVILI, A. INCORONATO. 2006a. Paleomagnetic dating of lava flows of uncertain age, Somma-Vesuvius volcanic complex (Southern Italy). *International Geology Review (Int. Geol. Rev.)* 48/4: 349-359.
- CONTE-FASANO, G., J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, A. GOGUITCHAICHVILI, A. INCORONATO, P. TIANO. 2006b. Lava identification by paleomagnetism: a case study and some problems surrounding the 1631 eruption of Mount Vesuvius, Italy. *Earth Planets Space* 58: 1061-1069.
- GIACOMELLI, L., A. PERROTA, R. SCANDONE, C. SCARPATI. 2003. The eruption of Vesuvius of 79 AD and its impact on human environment in Pompei. *Episodes* 26/3: 234-237.
- GUIDOBONI, E., E. BOSCHI. 2006. Vesuvius before the 1631 eruption. *EOS, Transactions American Geophysical Union (Trans. Am. Geophys. Union)* 87/40: 417, 423.
- INCORONATO, A., A. ANGELINO, R. ROMANO, A. FERRANTE, R. SAUNA, G. VANACORE, C. VECHIONE. 2002. Retrieving geomagnetic secular variations from lava flows: evidence from Mount Arso, Etna and Vesuvius (southern Italy). *Geophysical Journal International (Geophys. J. Int.)* 149: 724-730.
- ISMAIL-ZADEH, A., J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, A. KIJKO, K. TAKEUCHI, I. ZALIAPIN, EDS. 2014. *Extreme Natural Hazards, Disaster Risks and Societal Implications*. Cambridge University Press. Cambridge. 402 pp.
- LE HON, M. 1865. Histoire complete de la grande eruption du Vesuve de 1631. *Bulletin de l'Académie des Sciences, Lettres et Beaux Arts. Belge* 20: 483-538.
- PAVÓN-CARRASCO, F. J., M. L. OSETE, J. M. TORTA, A. DE SANTIS. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters (Earth Planet. Sci. Lett.)* 388: 98-109.
- PRINCIPE, C., J. C. TANGUY, S. ARRIGHI, A. PAIOTTI, M. LE GOFF, U. ZOPPI. 2004. Chronology of the Vesuvius' activity from AD 79 to 1631 based on archaeomagnetism of lavas and historical sources. *Bulletin of Volcanology (Bull. Volcanol.)* 66: 703-724.
- ROLANDI, G., F. RUSSO. 1993. L'eruzione del Vesuvio del 1631. *Bollettino della Società Geologica Italiana (Boll. Soc. Geol. Ital.)* 112: 315-332.
- ROLANDI, G., A. BARRELLA, A. BORRELLI, G. D'ALESSIO. 1991. The 1631 Vesuvian eruption. En *International Conference on Active Volcanoes and Risk Mitigation (Napoli, Italy): Abstracts*.
- ROSI, M., R. SANTACROCE. 1986. L'attività del Somma-Vesuvio precedente l'eruzione del 1631. Dati stratigrafici e vulcanologici. En *Tremblement de terre, eruptions volcaniques et vie des hommes dans la Campanie Antique*, editado por C. Albore Livadie, pp. 15-33. Bibliothèque de l'Institute français de Naples 7.

RESEARCH ADVANCE

**ARCHAEOMAGNETIC DATING OF THE ERUPTION OF XITLE VOLCANO, BASIN OF MEXICO: IMPLICATIONS FOR THE MESOAMERICAN CENTERS OF CUICUILCO AND TEOTIHUACAN**

*Datación arqueomagnética de la erupción del volcán Xitle, cuenca de México: implicaciones para los centros mesoamericanos de Cuicuilco y Teotihuacan*

*Jaime Urrutia-Fucugauchi,\* Avto Goguitchaichvili,\*\*  
Ligia Pérez-Cruz,\* Juan Morales\*\**

\* Departamento de Geomagnetismo y Exploración, Instituto de Geofísica, UNAM, México;

\*\* Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN), Instituto de Geofísica, UNAM, México



Figure 1. Fragment of the mural paint of the Xitle eruption and impact on Cuicuilco (Artist: Alejandro Linares-García on display at Tlalpan Delegation, Mexico City).

**ABSTRACT.** *The Cuicuilco archaeological site in southern Basin of Mexico is covered by lava flows from the Xitle volcano. Dating the Xitle eruption and Cuicuilco abandonment has long been attempted.*

*Received: 12 April 2016. Accepted: 18 April 2016. Published: 25 April 2016.*

Edited & Published by Pascual Izquierdo-Egea. The English text was proofread by Michelle Young. Arqueol. Iberoam. License CC BY 3.0 ES. <http://laiesken.net/arqueologia/archivo/2016/30/4>.

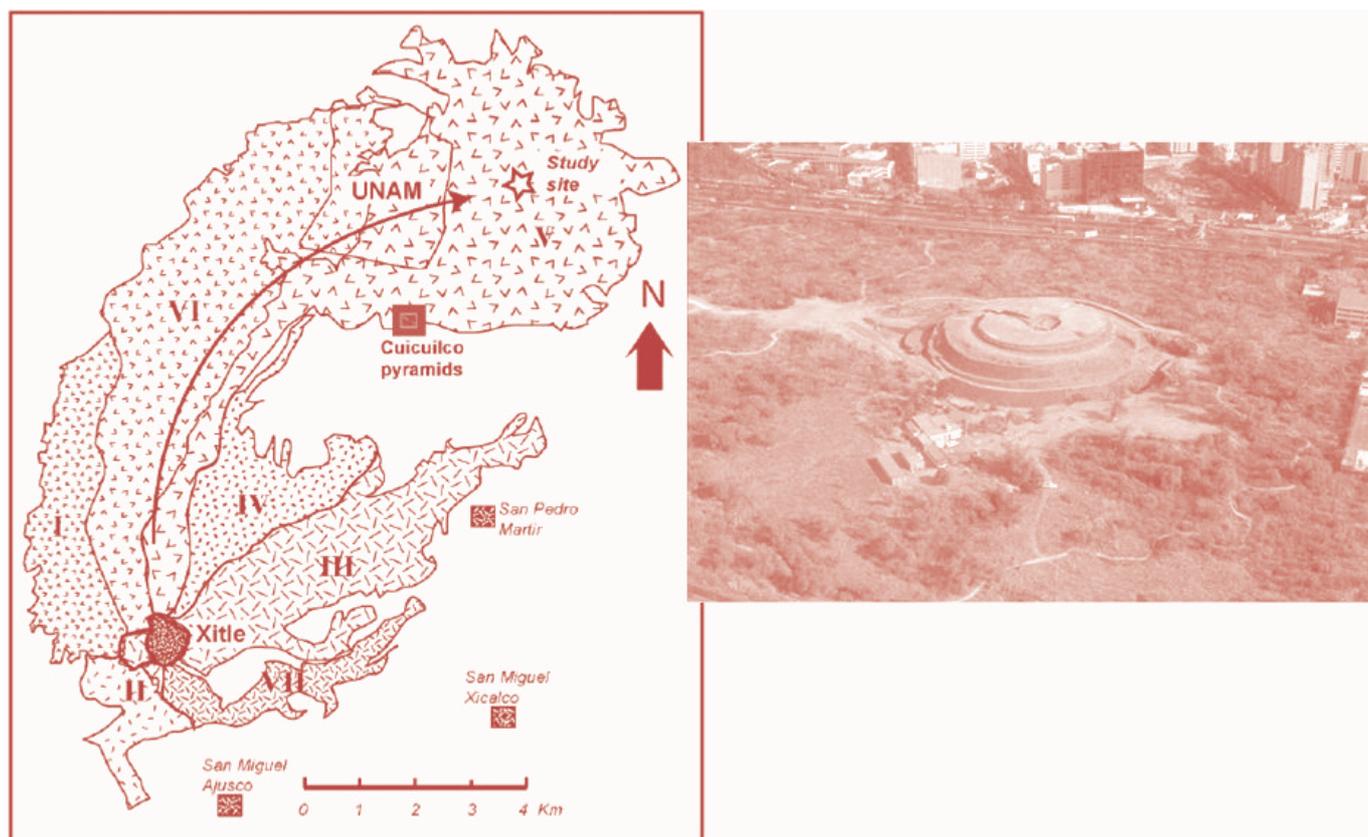


Figure 2. Schematic map of Xitle lava flows, southern Basin of Mexico (Delgado-Granados *et al.* 1998). Arrows indicate flow directions. Location of the Cuicuilco archaeological center is indicated (inset aerial view of Cuicuilco sector-A and the circular-cross section pyramid, surrounded by lava flows; Siebe 2000). The UNAM National University campus is built on the Xitle lava field.

Contrasting results with radiocarbon dates around 2000 and 1670 yr BP have been reported, with implications for the development of the Mesoamerican centers of Cuicuilco and Teotihuacan. Here, we analyze radiocarbon dates and paleomagnetic data for the Xitle lava flows. New age estimates for the eruption are determined from correlating full vector data with the geomagnetic secular variation reference model. The revised archaeomagnetic data give ages correlating with the radiocarbon chronology, with a mean of 2086 cal yr BP and 95% confidence interval from 1995 to 2177 cal yr BP. Bootstrap analysis of the calibrated radiocarbon and archaeomagnetic dates gives mean dates and confidence intervals of 2041 and 1968–2041 cal yr BP and 2035 and 1968–2073 cal yr BP, respectively. The interval estimated of ~90 BC to ~AD 20 supports a possible link between the abandonment of Cuicuilco and the early development of Teotihuacan.

**KEYWORDS:** Cuicuilco, Teotihuacan, Xitle volcano, Archaeomagnetism, Mesoamerica.

**RESUMEN.** La zona arqueológica de Cuicuilco, en el sur de la cuenca de México, está cubierta por flujos de lava del volcán Xitle. Se ha intentado la datación de la erupción y el abandono del centro de Cuicuilco aplicando diferentes métodos. Se han propuesto fechas contrastantes alrededor de 2000 y 1670 años AP, con implicaciones para el desarrollo de los centros urbanos mesoamericanos Cuicuilco y Teotihuacan. A continuación, analizamos las fechas de radiocarbono y los datos paleomagnéticos para los flujos de Xitle. Se presentan nuevas estimaciones de la edad de la erupción usando datos del vector completo con el modelo geomagnético de referencia. Los datos paleomagnéticos revisados dan edades con una media de 2086 años AP e intervalo de confianza del 95 % entre 1995–2177 años AP. El análisis bootstrap de las edades radiocarbónicas y arqueomagnéticas proporciona edades medias e intervalos de confianza de 2041 y 1968–2041 años AP y 2035 y 1968–2073 años cal AP, respectivamente. El intervalo estimado de ~ 90 a.C. a 20 d.C. es compatible con una posible relación entre el abandono de Cuicuilco y el desarrollo de Teotihuacan.

**PALABRAS CLAVE:** Cuicuilco, Teotihuacan, volcán Xitle, arqueomagnetismo, Mesoamérica.

## ARCHAEOMAGNETIC AND RADIOCARBON DATING

### INTRODUCTION

Xitle is a monogenetic cinder cone located in the southern Basin of Mexico, on the northern slope of the Ajusco volcanic complex. It forms part of the Chichinautzin monogenetic volcanic field developed in the arc front zone of the Trans-Mexican volcanic belt (Urrutia-Fucugauchi & Martin 1993). Xitle is one of the youngest volcanoes and its lava flows cover the Cuicuilco archaeological center (Figs. 1, 2). Cuicuilco represents an early urban settlement in the Basin of Mexico (Heizer & Bennyhoff 1958). The eruption of Xitle volcano has been linked to the abandonment of the site, which was covered by tephra and lava flows. Beginning with the initial excavation projects, determining the age of the eruption has attracted considerable interest. Arnold and Libby (1951) reported a date of  $2422 \pm 250$  yr BP, as part of the first date set obtained with the radiocarbon method (Libby 1955). Since then, more than 30 radiocarbon dates for samples from the Xitle lavas and Cuicuilco archaeological site have been reported, which present a wide multimodal  $\sim 4000$  to  $\sim 1500$  yr BP distribution (Urrutia-Fucugauchi 1996).

The first date of Arnold and Libby (1951) was obtained from a soil sample recovered beneath the lava. Subsequent studies have dated samples from soils and charcoal from outcrops and from archaeological excavations in different sectors of the lava field and in the Cuicuilco site. Dates around 2000–1960 yr BP and younger dates around 1530–1630 yr BP have been proposed for the Xitle eruption (e.g. Fergusson & Libby 1963; Cordova *et al.* 1994; Urrutia-Fucugauchi 1996; Siebe 2000; Gonzalez *et al.* 2000). Older or younger dates present archaeological implications for the abandonment of the site, population migration and relationships to the development of the Teotihuacan urban center (Nichols 2016). Discussion on the age of the eruption has focused on the stratigraphic context and nature of the samples dated, with arguments for and against its temporal relation to the tephra and lavas (Cordova *et al.* 1994; Gonzalez *et al.* 2000). In this study we present an analysis using paleomagnetic data retrieved from the lava flows. For the archaeomagnetic dating we use full vector data with the remanent magnetization directions and paleointensities and the recently developed archaeomagnetic reference curve.

The basaltic flows of the Xitle eruption cover an extensive  $> 80$  km<sup>2</sup> area on the Ajusco volcano slope and into the adjacent plain, where the Cuicuilco center was built and nowadays is occupied by the urban development of Mexico City (Fig. 2). The flows have long been studied, with several distinct flow and tephra units mapped (Delgado-Granados *et al.* 1998). Paleomagnetic studies have been conducted, reporting remanent magnetization directions and paleointensities from different sites in the lava field (e.g. Nagata *et al.* 1965; Urrutia-Fucugauchi 1996; Morales *et al.* 2001, 2006; Alva-Valdivia 2005).

The paleomagnetic directions present northward declinations and downward inclinations with small within-site angular dispersion. The mean-site inclinations mainly cluster around the dipolar direction, with some showing shallower inclinations (Urrutia-Fucugauchi 1996). The overall mean direction determined for 26 sites is Dec =  $359.8^\circ$ , Inc =  $32.8^\circ$ ,  $k = 167$  and  $\alpha_{95} = 2.2^\circ$ . The mean direction for the shallow inclination group is N = 7, Dec =  $1.5^\circ$ , Inc =  $26.7^\circ$ ,  $k = 338$  and  $\alpha_{95} = 3.3^\circ$ . The mean direction for the dipolar inclination group is N = 19, Dec =  $359.0^\circ$ , Inc =  $35.1^\circ$ ,  $k = 247$  and  $\alpha_{95} = 2.1^\circ$ . Paleointensities were determined for some sites, using the Thellier double-heating and Shaw methods, giving a mean of N = 20,  $60.5 + 9.2$   $\mu\text{T}$  (a subset group gives a mean N = 13,  $56.5 + 6.2$   $\mu\text{T}$ ). Alva-Valdivia (2005) reported data for 10 sites, with a mean direction of Dec =  $1.1^\circ$ , Inc =  $34.1^\circ$ ,  $k = 531$  and  $\alpha_{95} = 2.1^\circ$ . In this study, a larger set of paleointensities determined with the Thellier method was obtained. The paleointensities range from 48.6 to 73.9  $\mu\text{T}$ , with mean of N = 9,  $59.9 \pm 7.7$   $\mu\text{T}$ . For this study, the site mean directions and paleointensities reported in Urrutia-Fucugauchi (1996) and Alva-Valdivia (2005) are referred to the archaeomagnetic reference curve by Pavón-Carrasco *et al.* (2014). Inclusion of full vector data improves analysis, considering three variables with higher-resolution age estimates.

The radiocarbon dates range from  $4690 \pm 70$  to  $1430 \pm 200$  yr BP, with four groupings around 4000, 2400, 2000 and 1500 yr BP. Production of radioactive carbon varies with the strength of the geomagnetic field, which changes through time (Ramsey *et al.* 2006). Correcting the dates using the dendrochronologic reference curve provides calendar years ranging from about 3500 BC to AD 640, which spans a rather long interval. Radiocarbon dates ranging

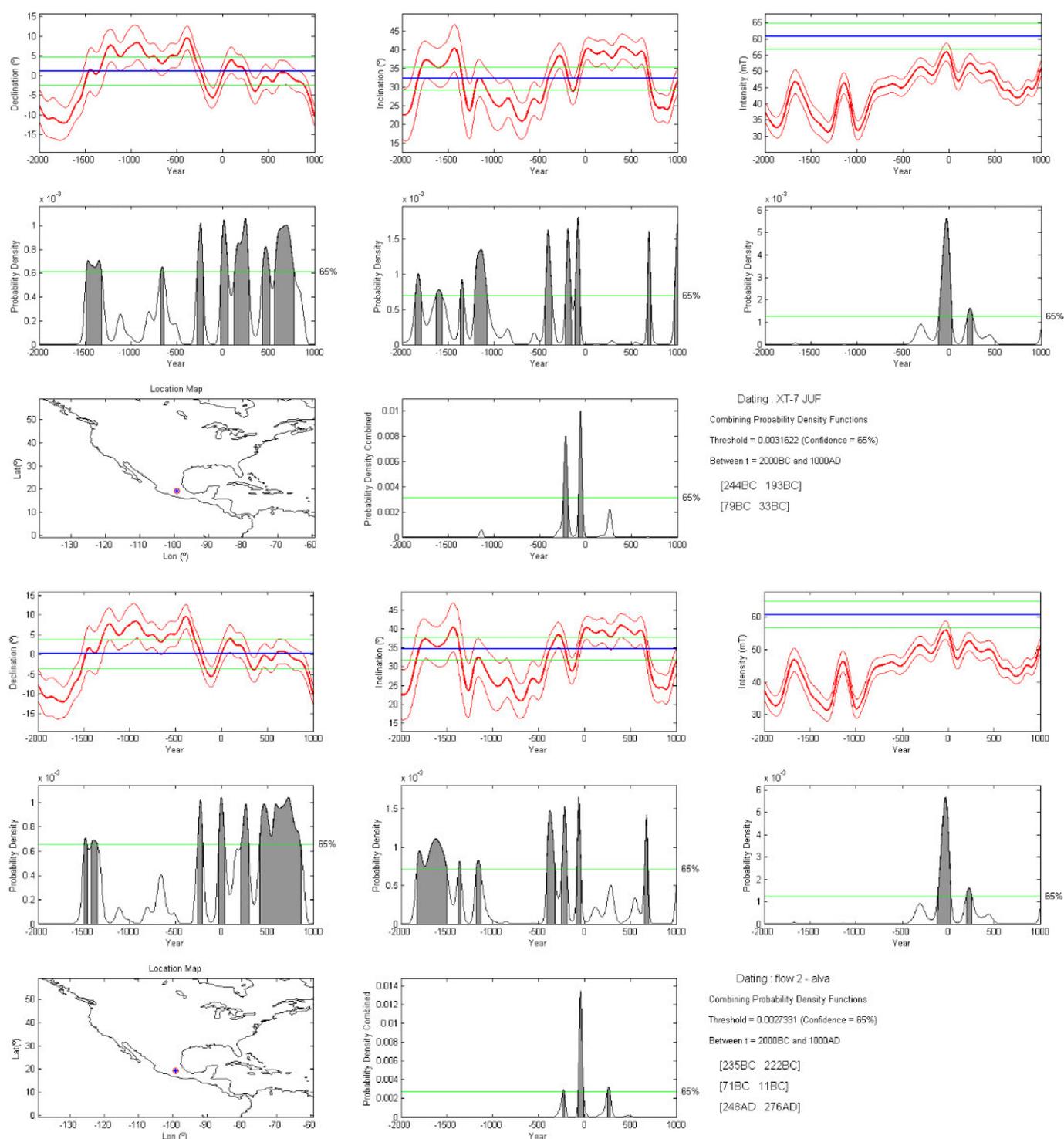


Figure 3. Archaeomagnetic dating of Xitle lavas. Diagrams show in red the master reference archaeomagnetic curves with uncertainty ranges for declination, inclination, and intensity (Pavón-Carrasco *et al.* 2014 geomagnetic model); and in blue the Xitle paleomagnetic data. Green lines give the cutoff values at a given probability level. Probability density functions from the secular variation curve analysis are shown in the lower diagrams. The combined analysis of full vector paleomagnetic data is given in the summary diagram with the reference geographic map. Results for sites XT-7 (Urrutia-Fucugauchi 1996, see above) and 6 (Alva-Valdivia 2005, see below).

from 1950 to 2100 yr BP result in calendar years around 100 BC to AD 60, which correlate with the expansion of Teotihuacan. Younger radiocarbon ages of about 1670 yr BP (Siebe 2000) imply that Cuicuilco inhabitants, if migrating to Teotihuacan,

were not involved in the center expansion (Nichols 2016; Cordova *et al.* 1994; Gonzalez *et al.* 2000). For this study, radiocarbon dates are recalibrated to the dendrochronologic curve and re-analyzed using bootstrap statistics.

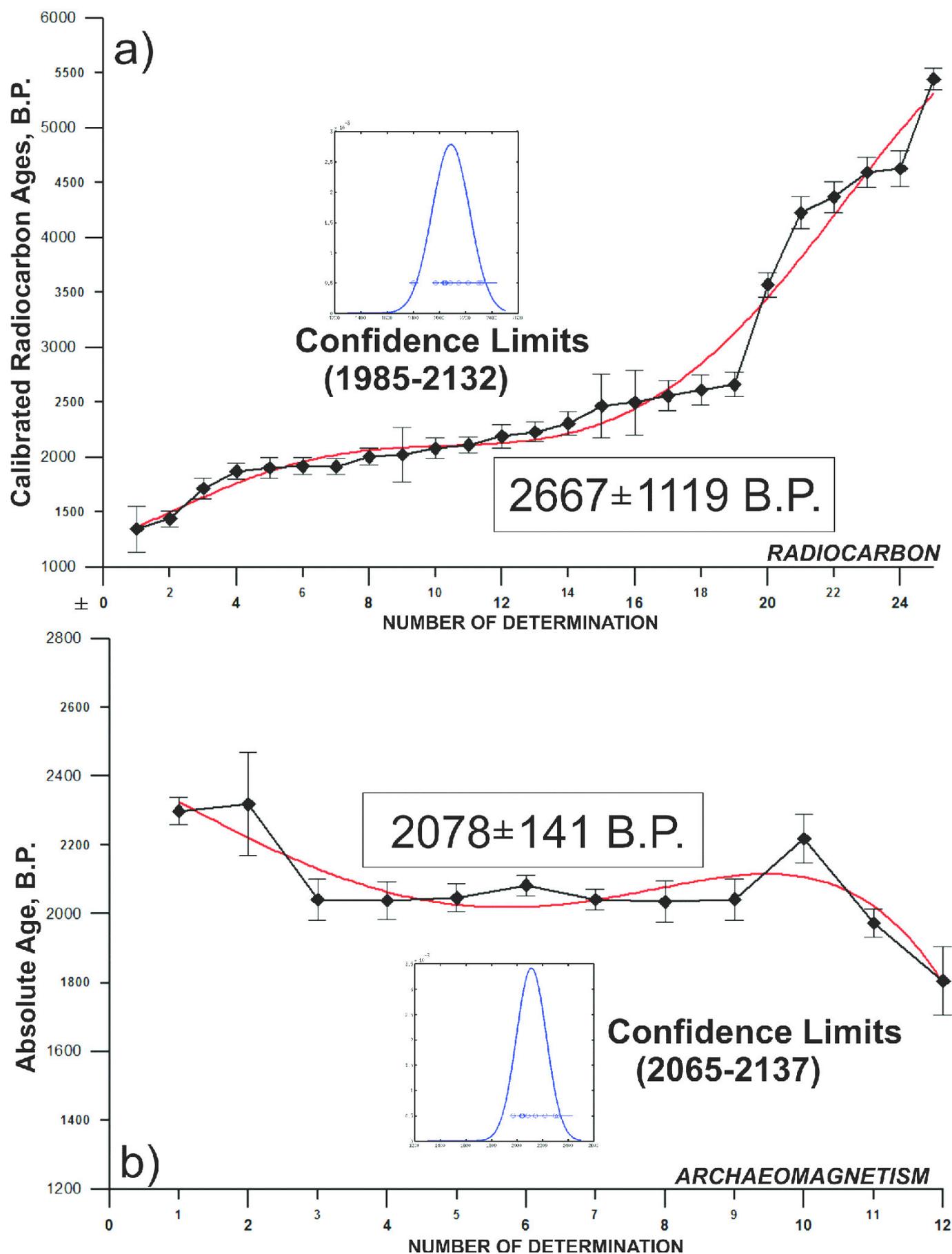


Figure 4. Distribution of radiometric (a) and archaeomagnetic dates (b). Mean dates and confidence limits derived from bootstrap analysis. Insets show Gaussian function fits (see text).

## ANALYSIS AND DISCUSSION

Archaeomagnetic dating relies on the spatio-temporal variations of the geomagnetic field and the record of remanent magnetization in volcanic and archaeological materials. Remanent magnetization, directional and paleointensity data, which record the geomagnetic field at time of magnetization acquisition, are correlated to a reference curve independently dated from the directional and intensity changes of the geomagnetic field. Resolution depends on the fidelity of the remanence recording and precision of the reference geomagnetic secular variation curve. For this study, the paleomagnetic data for the Xitle lavas have small angular dispersion at the within- and between-site levels. The mean directions determined in Urrutia-Fucugauchi (1996) and Alva-Valdivia (2005) are statistically indistinguishable, with small  $2.1^\circ \alpha_{95}$  overlapping confidence cones. Site-mean directions show northward declinations and inclinations close to the dipolar inclination, which are referred to the geomagnetic reference SHA.DIF.14k model of Pavón-Carrasco *et al.* (2014). We consider full vector data, adding the paleointensities in the correlation. The paleointensities present higher dispersion at the between site level, which has been analyzed, incorporating determinations with cooling rate corrections (Morales *et al.* 2006; Alva-Valdivia 2005).

For this study, the archaeomagnetic correlations are performed at site level (Fig. 3), to take into account the dispersion. The results show internal consistency, with small standard deviations. Assuming a Gaussian probability distribution, mean is 2068.5 cal yr BP with sigma of 143 and 95% confidence interval from 1995.4 to 2177.4 cal yr BP (Fig. 4). Analysis of radiocarbon dates in the 1200–2600 cal yr interval gives 12 dates with mean of 1916.8 cal yr BP and sigma of 227, with 95% confidence interval from 1772.2 to 2061.3 cal yr BP (Fig. 4). The mean radiocarbon date is younger than the archaeomagnetic date.

To analyze the difference in age estimates, we carried out a bootstrap analysis to constrain the best date estimates. Confidence limits are determined for each date and used to generate random series of 100 vectors. For the radiometric dates, the resulting matrix then has 12 x 100 elements and for the archaeomagnetic dates it has 9 x 100 elements. Vectors are fitted using splines and mean and confidence intervals calculated. The resulting mean for the archaeomagnetic dates is 2035 cal yr BP, with a 95% confidence interval from 1968 to 2073 cal yr BP.

The corresponding mean for the radiometric dates is 2041 cal yr BP, with 95% confidence interval from 1968 to 2041 cal yr BP (Fig. 4).

These estimates can be refined by deleting data points that fall off from the confidence interval in the probability density distributions. In this analysis, one archaeomagnetic and two radiometric dates are deleted. The resulting mean for the archaeomagnetic dates is 2101 cal yr BP with confidence interval of 2065–2137 cal yr BP. For the radiocarbon dates the mean is 2061 cal yr BP with a confidence interval of 1985–2132 cal yr BP.

## CONCLUSIONS

The age of the Xitle eruption is determined from correlating paleomagnetic full vector data with the recently constructed geomagnetic secular variation reference model. The revised archaeomagnetic dates have a mean age of 2086 cal yr BP with 95% confidence interval from 1995 to 2177 cal yr BP. Bootstrap analysis of the calibrated radiocarbon and archaeomagnetic dates gives mean ages and confidence intervals of 2041 cal yr BP and 1968–2041 cal yr BP and 2035 cal yr BP and 1968–2073 cal yr BP, respectively. These estimates are internally consistent, with overlapping calendar intervals of 91 BC to AD 18 and 83 BC to 18 AD, respectively. Results support a possible link between the Xitle eruption and collapse of Cuicuilco center and the early development of Teotihuacan.

## Acknowledgments

Authors are grateful to Rafael Garcia for the bootstrap analysis. Financial support from Conacyt-252149, DGAPA-PAPIIT IN105214 and IG101112.

## About the authors

JAIME URRUTIA-FUCUGAUCHI (*juf@geofisica.unam.mx*) is a Researcher at the Geophysical Institute, UNAM, Mexico City. AVTO GOGUITCHACHVILI is a Researcher at the Geophysical Institute and Chair of the National Archaeomagnetic Service, UNAM, Morelia. E-mail: *avto@geofisica.unam.mx*. LIGIA PÉREZ-CRUZ is a Researcher and Chair of the Department of Geomagnetism and Geophysical Exploration, UNAM, Mexico City. E-mail: *perezacruz@geofisica.unam.mx*.

JUAN MORALES (*jmorales@geofisica.unam.mx*) is a Researcher at the Geophysical Institute and Co-Chair of the National Archaeomagnetic Service, UNAM, Morelia.

## REFERENCES

- ALVA-VALDIVIA, L. 2005. Comprehensive paleomagnetic study of a succession of Holocene olivine basalt flow: Xitle Volcano (Mexico) revisited. *Earth Planets Space* 57: 839–853.
- ARNOLD, J.T., W.F. LIBBY. 1951. *Radiocarbon dates*. *Science* 113: 111–120.
- CORDOVA, C., A.L. MARTIN, J. LOPEZ. 1994. Palaeoland forms and volcanic impact on the environment of prehistoric Cuicuilco, southern Basin of Mexico. *Journal of Archaeological Science (J. Archaeol. Sci.)* 21: 585–596.
- DELGADO-GRANADOS, H. *ET ALII*. 1998. Geology of the Xitle volcano in southern Mexico City—A 2000-year-old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas (Rev. Mex. Ciencias Geol.)* 15: 115–131.
- FERGUSON, G.J., W.F. LIBBY. 1963. UCLA radiocarbon dates 11. *Radiocarbon* 5: 1–22.
- GONZALEZ, S., A. PASTRANA, C. SIEBE, G. DULLER. 2000. Timing of the prehistoric eruption of Xitle Volcano and the abandonment of Cuicuilco Pyramid, Southern Basin of Mexico. *Geological Society, London, Special Publications (Geol. Soc. London Sp. Pub.)* 171: 205–224.
- HEIZER, R., J. BENNYHOFF. 1958. Archaeological investigations of Cuicuilco, Valley of Mexico, 1956. *Science* 127: 232–233.
- LIBBY, W.F. 1955. *Radiocarbon Dating*. Chicago: Chicago University Press.
- MORALES, J., A. GOGUITCHAICHVILI, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI. 2001. A rock-magnetic and paleointensity study of some Mexican volcanic lava flows during the Latest Pleistocene to the Holocene. *Earth, Planets and Space* 53/9: 893–902.
- MORALES, J., L.M. ALVA-VALDIVIA, A. GOGUITCHAICHVILI, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, 2006. Cooling Rate Corrected Paleointensities From the Xitle Lava Flow: Evaluation of Within-Site Scatter for Single Spot-Reading Cooling Units. *Earth, Planets and Space* 58/10: 1341–1347.
- NAGATA, T., K. KOBAYASHI, E.J. SWARZ. 1965. Archaeomagnetic intensity studies of South and Central America, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity (J. Geomag. Geoelectr.)* 17: 399–405.
- NICHOLS, D.L. 2016. Teotihuacan. *Journal of Archaeological Research (J. Archaeol. Res.)* 24: 1–74.
- PAVÓN-CARRASCO, F.J., M.L. OSETE, J.M. TORTA, A. DE SANTIS. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters (Earth Planet. Sci. Lett.)* 388: 98–109.
- RAMSEY, C.B. *ET ALII*. 2006. Developments in radiocarbon calibration for archaeology. *Quaternary Science Reviews (Quaternary Sci. Rev.)* 25: 783–798.
- SIEBE, C. 2000. Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research (J. Volcanol. Geoth. Res.)* 104: 45–64.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. 1996. Paleomagnetic study of the Xitle-Pedregal de San Angel lava flow, southern basin of Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors (Phys. Earth Planet. Int.)* 97: 177–196.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., A.L. MARTIN. 1993. Implicaciones de los datos paleomagnéticos sobre la edad de la Sierra de Chichinautzin, Cuenca de México. *Geofísica Internacional (Geof. Int.)* 32: 523–533.

RESEARCH ADVANCE

**PRIMEROS RESULTADOS DE ARQUEOINTENSIDADES DE COLOMBIA: SITIOS PREHISPÁNICOS EN EL VALLE DEL RÍO MAGDALENA (HONDA-TOLIMA Y PUERTO BOGOTÁ-CUNDINAMARCA)**

*The First Archaeointensity Results from Colombia: Pre-Hispanic Sites Along Magdalena River (Honda-Tolima and Puerto Bogotá-Cundinamarca)*

**César S. Berkovich,<sup>1</sup> Avto Goguitchaichvili,<sup>1</sup>  
Germán A. Peña León,<sup>2</sup> Juan Morales<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Servicio Arqueomagnético Nacional, Instituto de Geofísica, UNAM, Campus Morelia, México

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

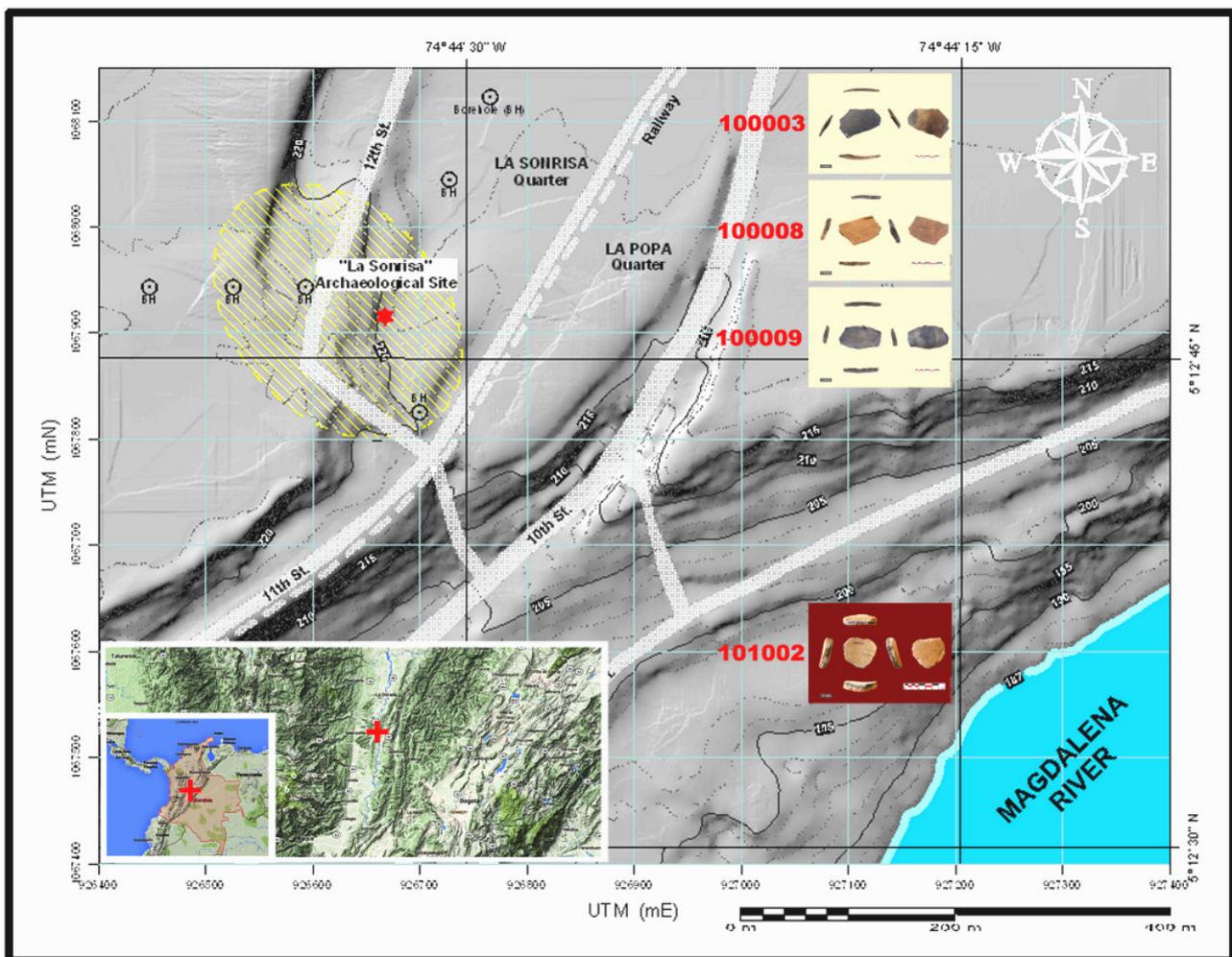


Figura 1. Sitios arqueológicos del curso medio del río Magdalena, Colombia: La Sonrisa (100000) con muestras cerámicas representativas.

*Recibido: 27-1-2017. Aceptado: 1-2-2017. Publicado: 7-2-2017.*

**RESUMEN.** Esta investigación reporta resultados de intensidad del campo geomagnético obtenidos de fragmentos cerámicos de dos sitios arqueológicos colombianos: La Sonrisa (Honda, Tolima) y La Salada (Puerto Bogotá, Cundinamarca). Se analizaron diez muestras para caracterizar la mineralogía magnética mediante las curvas de susceptibilidad magnética en función de la temperatura. Se determinaron arqueointensidades mediante experimentos tipo Thellier y se corrigieron por efectos de ritmo de enfriamiento y anisotropía magnética. La información de 60 especímenes se asoció a contextos arqueológicos con dataciones calibradas mediante el programa OxCal v4.2.4 de Ramsey y Lee (2013) y la curva atmosférica IntCal13 (Reimer et al. 2013), comparadas con modelos geomagnéticos. Los resultados son pioneros para la región porque arrojan nuevas luces para dos etapas precolombinas y el contacto con los primeros colonizadores europeos. Se pretende que los datos contribuyan a mejorar una herramienta alternativa —datación arqueomagnética— que facilite la datación directa de la zona contemplada en el presente estudio.

**PALABRAS CLAVE:** arqueomagnetismo, cerámica prehispánica, Colombia.

**ABSTRACT.** This study reports the results of the geomagnetic field intensity retrieved from ceramic fragments of two Colombian archaeological sites: La Sonrisa (Honda, Tolima) and La Salada (Puerto Bogotá, Cundinamarca). Ten pottery fragments were analyzed to characterize the magnetic mineralogy using the susceptibility vs. temperature curves. Archaeointensities were determined by double-heating Thellier-type experiments, corrected for cooling rates and anisotropy effects. Data from 60 specimens were associated with archaeological contexts through available calibrated data using the OxCal v4.2.4 program of Ramsey and Lee (2013), the atmospheric curve IntCal13 (Reimer et al. 2013), and compared against predictions from geomagnetic models. The results may be considered as pioneering for the region because they throw new light onto two pre-Columbian episodes and the contact with the first European settlers. It is intended that the data contribute to improving an alternative tool – archaeomagnetic dating – that facilitates the direct dating of the area considered in the present study.

**KEYWORDS:** Archaeomagnetism, Pre-Hispanic pottery, Colombia.

## INTRODUCCIÓN

Los minerales magnéticos contenidos en cerámicas arqueológicas adquieren una remanencia magnética cuando se enfrían por debajo de la temperatura de Curie ( $T_c$ ); dicha termorremanencia depende de la intensidad y dirección del campo magnético terrestre (CMT) de ese instante (Thellier y Thellier 1959; Genevey y Gallet 2002). La temporalidad de dicha magnetización puede estimarse comparando los parámetros magnéticos de tales materiales con una curva maestra local de la variación magnética.

En regiones donde las variaciones pasadas del CMT y, por lo tanto, la curva maestra están bien establecidas (por ejemplo, Europa), las fechas arqueomagnéticas pueden ser tan precisas como la datación radiométrica más cara, con la ventaja de que no se depende de la disponibilidad de carbono. Tales estudios abundan en Europa, pero esca-

sean en América. Salvo algunos realizados en rocas volcánicas, son pocos los de arqueointensidad en Iberoamérica (Morales *et al.* 2009).

Los vestigios arqueológicos para los pasados 2000 años son abundantes en Colombia, pero los estudios arqueomagnéticos son casi nulos. Algunos de los precursores en otros países de Sudamérica son Goguitchaichvili *et al.* (2011) y Greco (2012), marcando la pauta para estudios de «arqueointensidad» porque no se requieren cerámicas orientadas.

Los sitios reportados en esta investigación corresponden al curso medio del río Magdalena, en las inmediaciones de Honda-Tolima y Puerto Bogotá-Cundinamarca, Colombia: La Sonrisa (Honda 1) (100000), con coordenadas 18 N 0528991 0576497 (fig. 1), del periodo Tardío (siglos XII al XVI d. C.); y La Salada (Bodegas 3) (101000), con coordenadas 18 N 0530000 0576979, del periodo Intermedio entre el Formativo Tardío y el Tardío (siglo II d. C.) (Peña 2015). Al primero correspon-

den tres momentos de la misma ocupación (L2-3, L2-1, L1-3), mientras que al segundo solo uno (tabla 1 y fig. 3).

El objetivo primordial de este trabajo es obtener las primeras determinaciones de arqueointensidad absoluta para Colombia, con la finalidad de aportar datos confiables de arqueointensidad a la incipiente curva de variación secular regional, también conocida como *curva maestra arqueomagnética*.

## CONTEXTO ARQUEOLÓGICO

En los Andes noroccidentales es común encontrar los contextos arqueológicos de carácter doméstico en pequeñas geoformas planas, distribuidas en las laderas del paisaje montañoso y valles andinos (Obregón *et al.* 2004). Ejemplo de ello es que, por medio de excavaciones o recorridos de superficie, se han registrado fragmentos cerámicos cuya distribución, en general, forma patrones vinculados con la localización y configuración de viviendas preeuropeas (Gómez y Obregón 2008). Los fragmentos corresponden, mayoritariamente, a cerámica doméstica utilitaria, presentando, en algunos casos, huellas de uso tales como hollín ahumado. En estos contextos, donde los procesos erosivos no predominan, los fragmentos se encuentran sepultados dentro de una matriz de suelo orgánico que corresponde a los horizontes superiores del perfil edáfico.

Todo indica que las antiguas viviendas se edificaban completamente con materiales perecederos (sin basamentos o muros de piedra); sin embargo, es posible identificarlas a partir de las propiedades del suelo (compactación, color, composición química), la impronta de algún poste y la distribución misma de los restos cerámicos que, con frecuencia, delimitan su figura (Gómez y Obregón 2008).

Los materiales cerámicos analizados en el presente estudio fueron facilitados por el Dr. Peña León (Universidad Nacional de Colombia) y provienen de excavaciones arqueológicas realizadas en los sitios La Sonrisa (Honda 1) y La Salada (Bodegas 3). Estos se localizan en áreas cercanas a los bordes de las terrazas aluviales no inundables, próximas al río Magdalena, en donde se ubicaron los sitios de habitación rodeados de pequeñas huertas y se realiza-

ron actividades de pesca, caza y recolección (Peña *et al.* 2015)

Desde varios siglos antes de la era común (EC), y hasta la invasión española durante el siglo XVI, estos lugares fueron ocupados por sociedades agricultoras (de maíz, frijol y yuca, primordialmente) con sistemas de movilidad reducida y patrones de asentamiento poco centralizados, que elaboraban cerámica y orfebrería muy refinadas, cestería y tejidos (algodón, palmas). Tenían, hasta donde se puede imaginar, diversas estructuras políticas poco jerarquizadas, articuladas con sistemas de intercambio a escala regional (Gómez y Obregón 2008; Obregón 2008). De las crónicas del siglo XVI se deduce que en la región hubo una enorme diversidad cultural, manifiesta en las diversas lenguas, costumbres y sistemas de organización que documentaron las avanzadas de conquistadores ibéricos. Los contextos habitacionales de donde provienen las muestras analizadas podrían ordenarse en dos grandes periodos, denominados tradicionalmente como «tempranos» y «tardíos». Entre una y otra etapa es posible registrar cambios estilísticos en la cerámica y orfebrería, así como en algunos indicadores regionales del crecimiento demográfico y de la centralización de asentamientos. Los contextos «tempranos», a pesar de sus variaciones regionales, corresponden al primer milenio de la EC, mientras que los «tardíos» se ubican con posterioridad al siglo XI, llegando hasta el XVI. Por ejemplo, en el sitio Piedras Blancas, la unidad habitacional denominada como «UIA 05» corresponde al periodo Temprano; es decir, pertenece al intervalo entre los siglos I y XI. En cambio, las unidades «UIA 36» y «UIA 167» representan una etapa de ocupación entre los siglos XII y XV (Gómez y Obregón 2008).

Los análisis arqueomagnéticos basados en cerámicas de este trabajo corresponden a yacimientos del curso medio del río Magdalena. Uno de ellos en las inmediaciones de Honda, Tolima, Colombia es La Sonrisa (100000), perteneciente al periodo Tardío (fechado entre los siglos XII y XVI d. C.). Al oriente de este sitio, cruzando el Magdalena, pero en las inmediaciones del actual poblado de Puerto Bogotá (departamento de Cundinamarca), se encuentra la finca La Salada (101000), del periodo Intermedio (fechado en el siglo II d. C.) (Peña 2015). El caso del yacimiento La Sonrisa es excep-

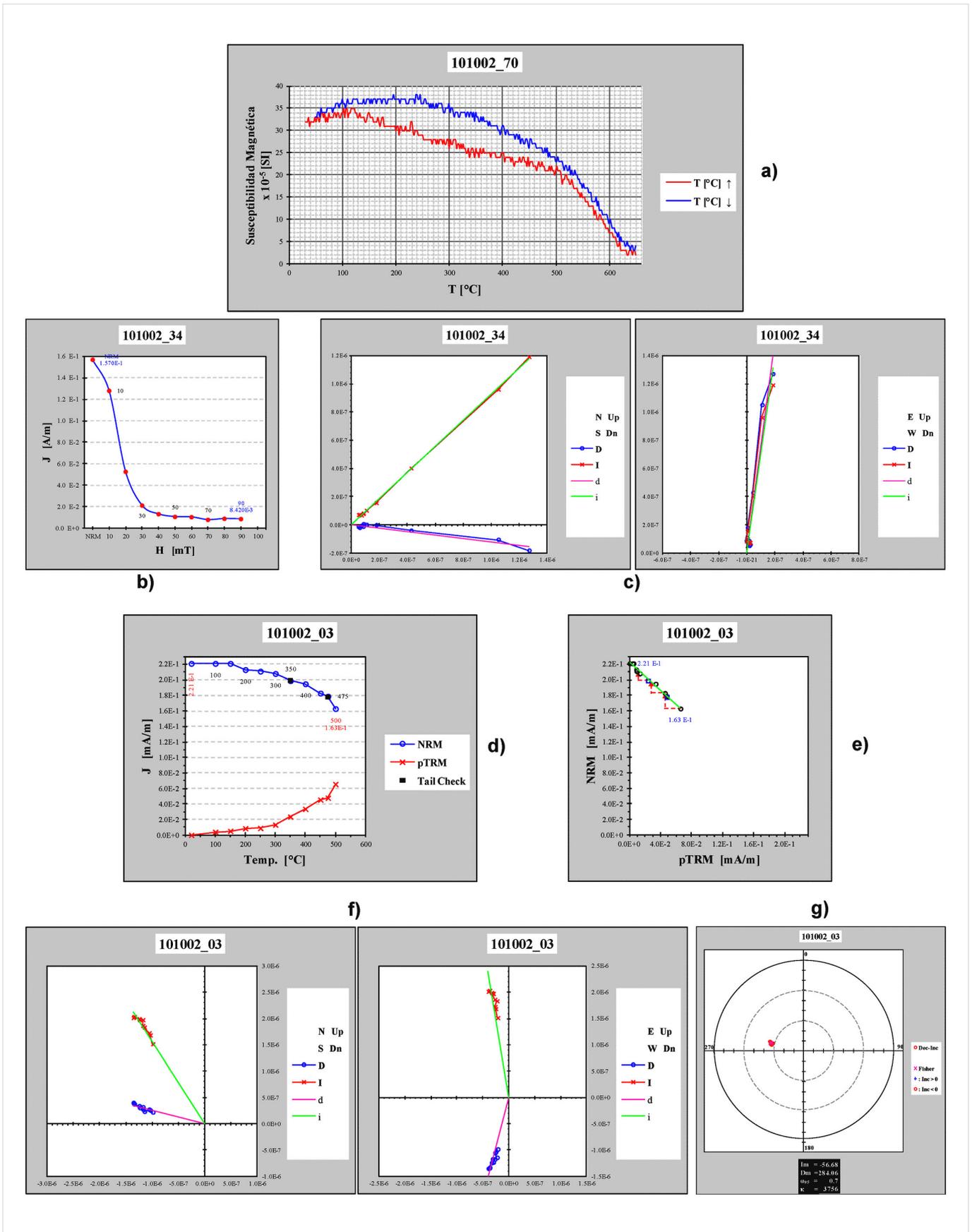


Figura 2. La Salada. Muestra 101002 y espécimen 03: a) susceptibilidad magnética vs. temperatura; b) desmagnetización por campos alternos (intensidad  $J$  vs. campo  $H$ ); c) diagrama de componentes direccionales o de Zijderveld en la desmagnetización por campos alternos; d) pérdida-adquisición de magnetización; e) diagrama de Arai; f) diagrama de Zijderveld en la desmagnetización térmica; g) estereograma de dispersión de inclinación-declinación.

Tabla 1. Arqueointensidades absolutas y datación de La Sonrisa y La Salada. Leyenda: las columnas enmarcadas indican discordancia en los datos, motivo por el cual fueron descartados. *Sample* = espécimen; *Lab-Cod* = clave en laboratorio; *T1-T2* = intervalo de temperaturas [°C]; *N* = etapas seleccionadas; *m* = pendiente;  $\pm \sigma m$  = error en m; *f* = fracción; *g* = espaciamiento; *q* = calidad; *H* = intensidad;  $\pm \sigma H$  = error en H; *H corr* = intensidad corregida; *Years (calBP)* = fecha calibrada; *Lab CODE* = laboratorio datación.

Sample	Lab-Cod	T1-T2	N	m	$\pm \sigma m$	f	g	q	H	$\pm \sigma H$	H corr	Years (cal BP)	Lab CODE	
100001_01	99A701A	200-515	9	-0.89	0.04	0.59	0.84	12	35.59	1.49	35.24			
100001_02	99A702A	100-540	12	-0.88	0.03	0.86	0.87	20	35.06	1.30	34.03			
100001_03	99A703A	20-560	14	-0.36	0.07	1.07	0.83	4						
100001_04	99A704A	350-540	7	-0.56	0.04	0.53	0.82	7						
100001_05	99A705A	20-560	14	-0.30	0.07	0.95	0.80	3						
100001_06	99A706A	20-560	14	-0.18	0.08	0.47	0.60	1						
									Mean =	35.3	34.6			
									1 s =	0.4	0.9			
100003_01	99A707A	450-560	6	-0.86	0.07	0.58	0.69	5	34.25	2.83	33.68			
100003_02	99A708A	475-560	5	-0.99	0.10	0.55	0.66	3						
100003_03	99A709A	20-560	14	-2.33	0.51	0.70	0.78	2						
100003_04	99A710A	475-560	5	-1.15	0.11	0.51	0.70	4						
100003_05	99A711A	20-560	14	-1.97	0.28	0.89	0.85	5						
100003_06	99A712A	500-560	4	-0.84	0.05	0.47	0.66	5	33.72	2.11	33.14			
									Mean =	34.0	33.4			
									1 s =	0.4	0.4			
									T Mean =	34.7	34.0			
									T 1 s =	0.8	0.9			
													La Sonrisa L2-3	
													789 ± 74	Beta-185965
100007_01	99A713A	200-450	6	-1.46	0.08	0.59	0.73	8						
100007_02	99A714A	20-560	14	-1.14	0.14	0.84	0.73	5						
100007_03	99A715A	20-560	14	-2.08	0.26	0.91	0.59	4						
100007_04	99A716A	150-450	6	-1.24	0.06	0.55	0.47	6						
100007_05	99A717A	20-560	14	-0.92	0.11	0.71	0.84	5	36.73	4.31	35.43			
100007_06	99A718A	150-450	6	-1.11	0.07	0.60	0.42	4						
									Mean =	36.7	35.4			
									1 s =	0.0	0.0			
100008_01	99A719A	400-560	7	-1.01	0.08	0.46	0.80	5	40.42	3.06	35.78			
100008_02	99A720A	450-560	5	-1.05	0.07	0.41	0.74	4						
100008_03	99A721A	350-560	8	-0.87	0.06	0.51	0.80	6	34.69	2.30	30.24			
100008_04	99A722A	450-560	5	-0.94	0.03	0.39	0.62	7	37.58	1.37	33.71			
100008_05	99A723A	300-560	8	-0.82	0.05	0.54	0.80	8						
100008_06	99A724A	400-560	7	-0.87	0.04	0.61	0.78	10	34.65	1.70	31.03			
									Mean =	36.8	32.7			
									1 s =	2.8	2.5			
									T Mean =	36.8	33.2			
									T 1 s =	2.4	2.5			
													La Sonrisa L2-1	
													749 ± 37	Beta-346779
100009_01	99A725A	475-560	5	-0.73	0.06	0.60	0.67	5	29.10	2.23	27.83			
100009_02	99A726A	475-560	5	-0.75	0.04	0.65	0.70	9	30.11	1.58	27.77			
100009_03	99A727A	475-560	5	-0.73	0.06	0.67	0.69	5	29.08	2.54	27.66			
100009_04	99A728A	475-560	5	-0.79	0.04	0.57	0.70	7	31.60	1.69	29.57			
100009_05	99A729A	475-560	5	-0.74	0.10	0.46	0.72	2						
100009_06	99A730A	475-560	5	-0.62	0.03	0.58	0.70	10						
									Mean =	30.0	28.2			
									1 s =	1.2	0.9			
									T Mean =	30.0	28.2			
									T 1 s =	1.2	0.9			
													La Sonrisa L1-3	
													348 ± 93	INAH-2522
101002_01	99B407A	100-515	13	-1.24	0.02	0.50	0.87	24	43.39	0.78	41.55			
101002_02	99B408A	400-560	7	-1.08	0.03	0.34	0.80	10	37.97	1.01	36.42			
101002_03	99B409A	400-560	7	-1.10	0.02	0.37	0.80	15	38.54	0.75	37.48			
101002_04	99B410A	100-560	13	-1.21	0.02	0.58	0.85	31	42.21	0.67	41.45			
101002_05	99B411A	150-560	7	-0.88	0.02	0.43	0.32	7						
101002_06	99B412A	200-560	9	-0.87	0.03	0.46	0.84	10						
									Mean =	40.5	39.2			
									1 s =	2.7	2.7			
									T Mean =	40.5	39.2			
									T 1 s =	2.7	2.7			
													F. La Salada	
													1714 ± 56	Beta-332404

cional, puesto que los análisis corresponden a distintos momentos de la misma ocupación (L2-3 pertenece a la más antigua:  $789 \pm 74$  años cal AP; L2-1:  $749 \pm 37$  años cal AP; y L1-3:  $348 \pm 93$  años cal AP).

Las investigaciones arqueológicas realizadas en las últimas décadas en el valle del río Magdalena demuestran la importancia de estas áreas para el estudio de los grupos humanos que poblaron Colombia durante la época prehispánica. Se consolidó como una ruta natural muy importante, de paso o para asentamiento tanto por grupos cazadores-recolectores como por sociedades agrícolas y alfareras, debido a la gran variedad de recursos naturales para la subsistencia (Peña 2013, 2015).

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS

### 1. Preparación de especímenes

Los tiestos cerámicos son marcados arbitrariamente, con flechas paralelas en un solo sentido, y se subdividen en 7 fragmentos para ser prensados individualmente en pastillas de sal de forma cilíndrica de dimensiones estándares (2.5 cm diámetro x 2.5 cm altura); 6 son orientados en las posiciones espaciales (x, -x, y, -y, z, -z) para su tratamiento térmico y disminuir con esto los efectos de la anisotropía magnética. El séptimo espécimen es utilizado para desmagnetización por campos alternos. La preparación de las pastillas de sal se realiza mediante el empleo de un dispositivo especial: un dado para prensado de núcleos paleomagnéticos, elaborado en acero inoxidable no magnético, acoplado a una prensa hidráulica (Morales 2008).

### 2. Experimentos

#### a) Susceptibilidad magnética vs. temperatura

Los experimentos para determinar las variaciones de la susceptibilidad magnética en función de la temperatura (curvas  $\kappa$ -T) se realizan en un horno *Bartington MS2WF*. La muestra se calienta a un ritmo de  $2^\circ\text{C}$  por minuto hasta alcanzar los  $700^\circ\text{C}$ , y se enfrían hasta  $50^\circ\text{C}$  con la misma razón,

obteniéndose de esta forma dos curvas: una de la etapa de calentamiento y la otra del enfriamiento (fig. 2a).

#### b) Desmagnetización por campos alternos

Mediante un desmagnetizador *AGICO LDA-3A*, los especímenes son expuestos, en diferentes etapas, a diversos campos magnéticos alternos de intensidad decreciente con el tiempo, hasta alcanzar los 100 mT de amplitud con incrementos de 10 mT. Después de cada etapa, se mide su magnetización en un magnetómetro *AGICO JR6*. A partir de estas mediciones, es posible determinar la utilidad de los tiestos para la determinación de arqueointensidad por medio del método de Thellier (fig. 2b-c).

#### c) Determinación de arqueointensidades

El método de Thellier y Thellier (1959), modificado por Coe (1967), consiste en calentar gradualmente las muestras a diferentes temperaturas en pasos dobles: en ausencia de campo magnético en el primero de ellos, y bajo la influencia de un campo magnético de laboratorio durante el segundo. Después de cada paso, es medida la magnetización resultante: la magnetización remanente natural (NRM) restante tras el primer calentamiento, y la magnetización termorremanente parcial (pTRM) adquirida durante el segundo de estos. Para la realización de esta investigación se utilizó un protocolo que consistió en 37 etapas térmicas, en el intervalo de  $100$ - $560^\circ\text{C}$ , y se utilizó un horno *ASC Scientific* y un magnetómetro de giro *AGICO JR6*. La figura 2d-2g muestra la gráfica de pérdida-adquisición de magnetización, los diagramas de Arai (NRM-pTRM), Zijderveld (componentes direccionales) y el estereograma (inclinación-declinación) de los resultados de este experimento para el espécimen 101002\_3 de La Salada.

#### d) Arqueointensidades absolutas

Las arqueointensidades obtenidas mediante las remanencias magnéticas fueron corregidas por los efectos de ritmo de enfriamiento. Estos datos, aso-

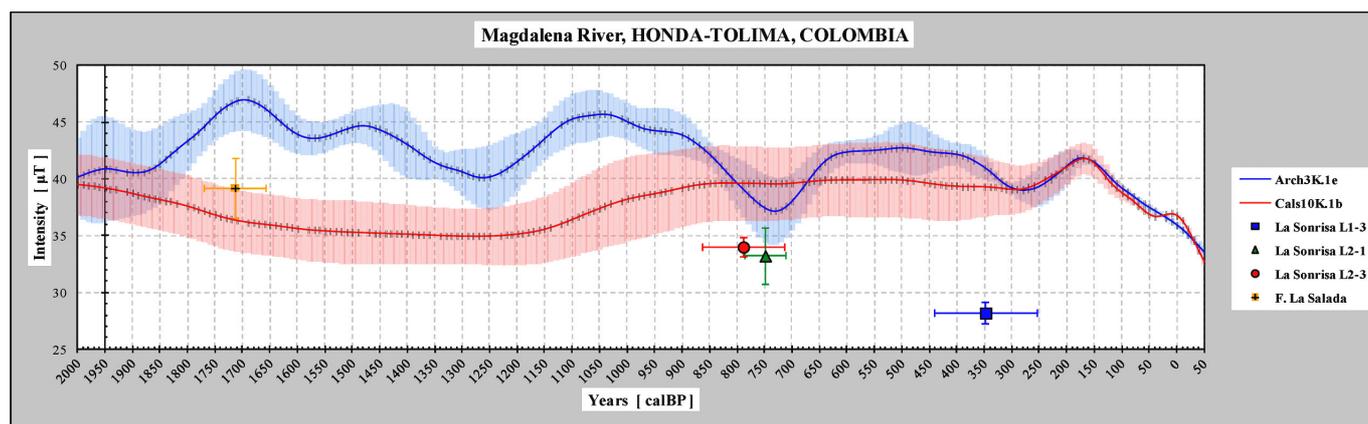


Figura 3. Comparación de las arqueointensidades absolutas obtenidas de los sitios arqueológicos La Sonrisa y La Salada con los modelos *ARCH3K.1e* y *CALS10K.1b* (*GEOMAGIA v3*).

ciados con las dataciones radiométricas calibradas con el *OxCal v4.2.4* (Ramsey y Lee 2013) y la *IntCal13* (Reimer *et al.* 2013) se compararon con los modelos *ARCH3K.1* y *CALS10K.1b* mostrados en la tabla 1 y figura 3.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los materiales arqueológicos permiten estudiar las variaciones del CMT tanto en sus componentes direccionales como en su intensidad, proporcionando un registro de alta precisión temporal.

El presente análisis de cerámicas arqueológicas aporta información sobre las variaciones de la intensidad del CMT en las márgenes del curso medio del río Magdalena, Colombia, en el lapso 2000-400 años AP.

A partir de los resultados obtenidos, no es posible aún establecer una tendencia de las variaciones de la arqueointensidad en la región, debido a la disparidad en la cantidad y calidad de datos con respecto a otras partes del mundo. Prueba de ello es la gran discordancia de datos en el último nivel de La Sonrisa, muy por debajo de lo predicho por los modelos geomagnéticos. Sin embargo, se consideran importantes los resultados obtenidos de esta investigación por el aporte que proporcionan a las variaciones de intensidad en esta área.

Se pretende que los datos contribuyan a mejorar una herramienta que facilite la datación arqueomagnética directa de la zona contemplada en el presente estudio.

## Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada financieramente por el proyecto CONACYT n.º 252149 y, parcialmente, por UNAM-PAPIIT IN101717.

## Sobre los autores

CÉSAR S. BERKOVICH ([berkovich.cesar@gmail.com](mailto:berkovich.cesar@gmail.com)) es Licenciado en Arqueología por la Escuela Nacional de Antropología e Historia, Maestro en Ciencias en el área de Geología Ambiental por el Instituto de Geología de la UNAM y aspirante a Doctor en la sección de magnetismo por el Instituto de Geofísica de la UNAM. Ha participado en más de una decena de proyectos arqueológicos en varias regiones de México y ha hecho investigaciones sobre paleosuelos del Altiplano Central.

AVTO GOGUITCHAVILI ([avto@geofisica.unam.mx](mailto:avto@geofisica.unam.mx)) es Licenciado en Física por la Universidad Estatal de Tbilisi (República de Georgia), Maestro y Doctor en Geofísica con especialidad en geomagnetismo por la Universidad de Montpellier, Francia. Actualmente es Investigador Titular del Instituto de Geofísica, Campus Morelia de la UNAM, y corresponsable del Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN).

GERMÁN A. PEÑA LEÓN ([gapenal@unal.edu.co](mailto:gapenal@unal.edu.co)) es Antropólogo con tesis de grado en Arqueología de la Universidad Nacional de Colombia y Doctor en Arqueología y Prehistoria de la Universidad Autónoma de Madrid. Se desempeña como Profesor Asociado del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia. Ha realizado investigaciones

en la vertiente suroccidental de la Sabana de Bogotá y en el valle medio del río Magdalena. Su principal campo de interés es la Arqueozoología.

JUAN MORALES (*jmorales@geofisica.unam.mx*) es Licenciado en Física, Maestro y Doctor en Geofísica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus líneas de investigación destaca el arqueomagnetismo, con contribuciones importantes tanto en Mesoamérica como en otras partes del mundo. Actualmente es responsable del Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) y corresponsable del Servicio Arqueomagnético Nacional.

## REFERENCIAS

- 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.
- GENEVEY, A., Y. GALLET. 2002. Intensity of the geomagnetic field in western Europe over the past 2000 years: New data from ancient French pottery. *Journal of Geophysical Research* 107/B11: 2285.
- GOGUITCHAICHVILI, A., C. GRECO, J. MORALES. 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.
- GÓMEZ L., L. I., M. OBREGÓN C. 2008. Unidades habitacionales y cambio social en el noroccidente de Suramérica. *International Journal of South American Archaeology* 3: 46-57.
- GRECO, C. 2012. *Integración de datos arqueológicos, radiocarbónicos y geofísicos para la construcción de una cronología de Yocavil y alrededores*. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 499 pp.
- MORALES, J. 2008. *Sistema para prensado de núcleos paleomagnéticos*. Manual interno de laboratorio. Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA), Instituto de Geofísica, UNAM, Campus Morelia. 4pp.
- MORALES, J., A. GOGUITCHAICHVILI, G. ACOSTA, T. GONZÁLEZ-MORÁN, L. ALVA-VALDIVIA, J. ROBLES-CAMACHO, M. HERNÁNDEZ-BERNAL. 2009. Magnetic properties and archeointensity determination on pre-Columbian pottery from Chiapas, Mesoamerica. *Earth, Planets and Space* 61/1: 83-91.
- OBREGÓN, M. 2008. *Unidades habitacionales y cambio social. Una mirada comparativa a contextos del área intermedia en Mesoamérica*. Tesis de maestría. Facultad de Filosofía y Letras e Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- PEÑA, G. 2013. *Pescadores de los raudales del río Magdalena durante el periodo Formativo Tardío (siglos V al I a. C)*. Universidad Nacional de Colombia, Vicerrectoría de Investigación. Colección Dirección de Investigación, Sede Bogotá.
- PEÑA, G., R. SALAS, J. M. DÍAZ, J. M. LLANOS. 2015. *Estudio arqueológico del impacto de la pesca precolombina en la zona de raudales del río Magdalena durante el periodo Tardío (siglos XI al XII d. C)*. Colciencias-Universidad Nacional de Colombia. Inédito.
- RAMSEY, C. B., S. LEE. 2013. Recent and planned developments of the program OxCal. *Radiocarbon* 55/2-3: 720-730.
- REIMER, P. J., E. BARD, A. BAYLISS, J. W. BECK, P. G. BLACKWELL, C. B. RAMSEY, C. E. BUCK, H. CHENG, R. L. EDWARDS, M. FRIEDRICH, P. M. GROOTES, T. P. GUILDERTSON, H. HAFLIDASON, I. HAJDAS, C. HATTÉ, T. J. HEATON, D. L. HOFFMANN, A. G. HOGG, K. A. HUGHEN, K. F. KAISER, B. KROMER, S. W. MANNING, M. NIU, R. W. REIMER, D. A. RICHARDS, E. M. SCOTT, J. R. SOUTHON, R. A. STAFF, C. S. M. TURNEY, J. VAN DER PLICHT. 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55/4: 1869-1887.
- THELLIER, E., O. THELLIER. 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annales de Géophysique* 15: 285-376.

RESEARCH ADVANCE

**GUACHIMONTONES DE TEUCHITLÁN: UN ESTUDIO  
ARQUEOMAGNÉTICO PARA MEJORAR LA CRONOLOGÍA  
DEL OCCIDENTE DE MÉXICO**

*Guachimontones of Teuchitlan: An Archaeomagnetic Survey  
to Improve the Chronology of Western Mexico*

*Verónica López-Delgado,<sup>1,2</sup> Ana M. Soler-Arechalde,<sup>1,2</sup>  
J. Rodrigo Esparza-López,<sup>3</sup> Avto Gogutchachvili,<sup>1,2</sup>  
Cecilia I. Caballero-Miranda,<sup>1</sup> Juan Morales<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica, UNAM, Ciudad de México, México

<sup>2</sup> Servicio Arqueomagnético Nacional, Instituto de Geofísica, UNAM, Campus Morelia, México

<sup>3</sup> Centro de Estudios Arqueológicos, El Colegio de Michoacán, A. C., La Piedad, México



Figura 1. Toma de la muestra Gu10, piso en el interior del Círculo B, Loma Alta.

*Recibido: 30-1-2017. Aceptado: 8-2-2017. Publicado: 15-2-2017.*

**RESUMEN.** *A través de la datación arqueomagnética de Guachimontones de Teuchitlán, Jalisco, se contribuye a la cronología prehispánica del Occidente de México. A partir de 16 muestras arqueomagnéticas (81 especímenes en total) de hornos, pisos quemados y no quemados recolectados en 2005 y 2010, se hicieron mediciones para determinar la dirección media de cada muestra en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la UNAM (Ciudad de México y Campus Morelia). Se obtuvieron dataciones arqueomagnéticas con  $\alpha_{95} < 10^\circ$  para el 88% de las muestras y corresponden a las épocas de ocupación del sitio. Este estudio aporta 2 nuevos datos a la curva de variación de Mesoamérica, registra modificaciones arquitectónicas en una edificación y apoya la teoría de reocupación del sitio hacia el periodo Epiclásico (450-900 d. C.).*

**PALABRAS CLAVE:** *datación arqueomagnética, Occidente de México, Guachimontones.*

**ABSTRACT.** *This study contributes to the pre-Hispanic chronology of Western Mexico through archaeomagnetic dating of the archaeological site Guachimontones (Teuchitlán, Jalisco). Systematic magnetic measurements were carried out to determine the mean direction of each sample at the UNAM paleomagnetism laboratories (Mexico City and Campus Morelia). Sixteen analyzed samples (81 specimens in total) come from furnaces, burned and unburnt floors, collected between 2005 and 2010. Archaeomagnetic dates with precision parameter  $\alpha_{95} < 10^\circ$  were obtained for 88% of the samples, and corresponds to the site occupation periods. This study thus contributes new and reliable data to the reference variation curve of Mesoamerica in addition to documenting architectural modifications in the building sequence at Guachimontones and supporting the theory of reoccupation of this site during the Epiclassic period (450-900 A.D.).*

**KEYWORDS:** *Archaeomagnetic dating, Western Mexico, Guachimontones.*

## INTRODUCCIÓN

Guachimontones de Teuchitlán es un sitio arqueológico del estado de Jalisco y centro nuclear de la tradición Teuchitlán. Alojado en una cuenca lacustre dentro de los valles del volcán Tequila, pertenece al Occidente de México, vasta área que ha sido poco estudiada. El sitio se caracteriza por estructuras circulares de tamaño monumental rodeadas de plataformas que fueron construidas con mampostería, mezcla de rocas y arcillas finas. La cronología de la tradición Teuchitlán, basada en registros cerámicos (Weigand *et al.* 2008), está compuesta de 8 etapas desde el año 1500 a. C. hasta el 1250 d. C. Las nuevas dataciones arqueomagnéticas son de suma importancia para corroborar o reinterpretar los datos de radiocarbono con que se cuenta, a fin de establecer una cronología detallada para el Occidente de México.

## LA CURVA DE VARIACIÓN SECULAR DE MESOAMÉRICA

La datación arqueomagnética se basa en las variaciones del campo magnético terrestre en el tiem-

po y espacio, así como en la capacidad de los minerales ferromagnéticos de orientarse con la dirección del campo al ser expuestos a temperaturas superiores a su temperatura de Curie ( $T_c$ ), o durante su deposición. El contar con una curva de variación secular (CVS) para una región hace posible comparar la dirección de magnetización de una pieza arqueológica con las variaciones de dicha CVS y, de esta forma, determinar intervalos temporales en los que exista coincidencia para, posteriormente, seleccionar un intervalo acorde al contexto arqueológico, fase constructiva o alguna datación de radiocarbono existente.

La primera CVS para Mesoamérica fue propuesta por Wolfman (1990). En 1999 se mostró que los estucos pueden comportarse como rocas sedimentarias y registrar el campo magnético en el momento de fraguarse (Hueda *et al.* 2004). A partir de entonces, se realizaron múltiples estudios en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la UNAM, reportados en tesis de Arqueología, Física y posgrado de Ciencias de la Tierra (Soler-Arechalde *et al.* 2006), añadiendo a la CVS solo aquellos datos con dataciones por radiocarbono asociadas. La CVS actual (Soler-Arechalde *et al.* 2006) se modeló me-

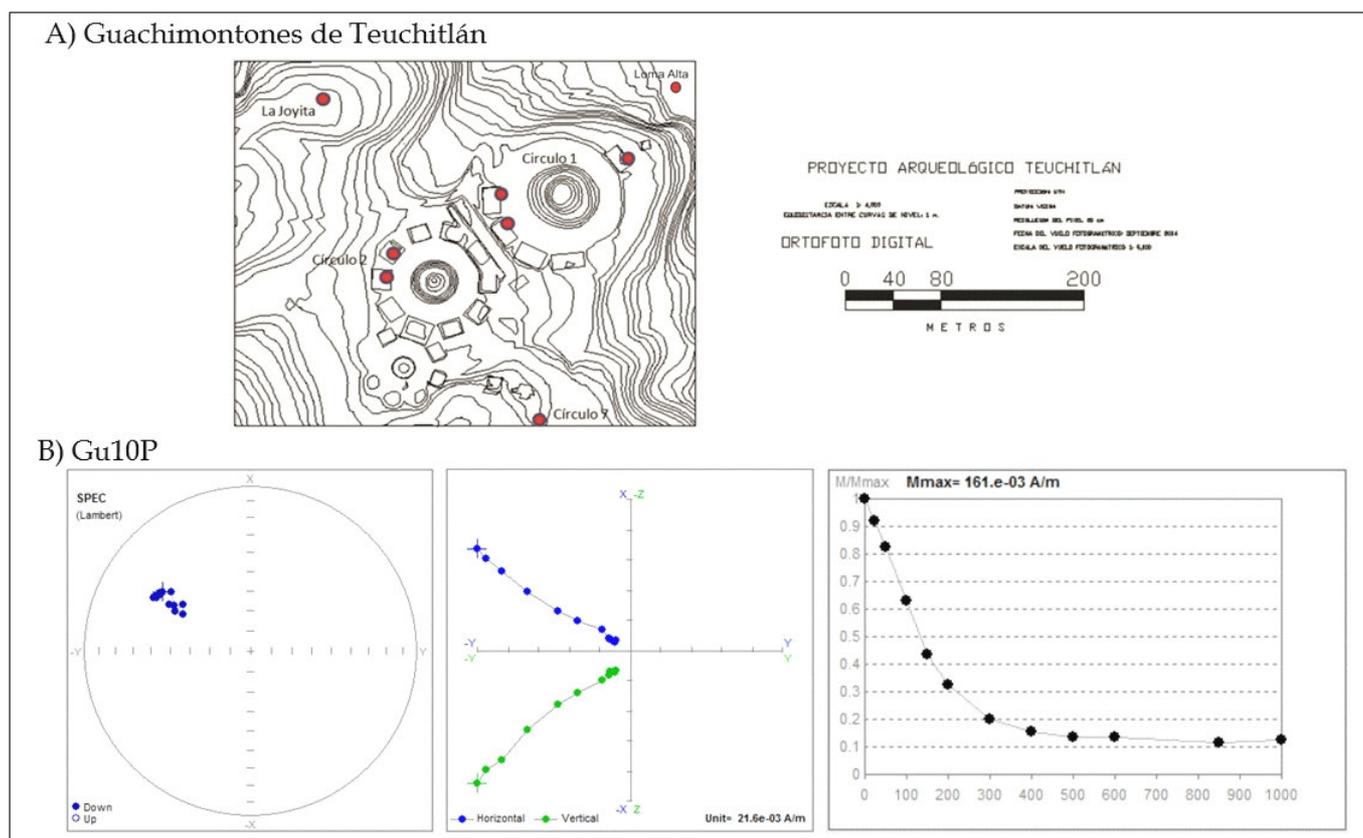


Figura 2. A) Ubicación de muestras en plano de Guachimontones de Teuchitlán (modificado de Weigand et al. 2008). En rojo se observa la ubicación donde se tomaron las muestras arqueomagnéticas en el sitio. B) Desmagnetización del espécimen Gu10P analizado en Remasoft v3.0. Panel izquierdo: proyección estereográfica en la que se observa la estabilidad de la magnetización durante el proceso de desmagnetización. Panel central: diagrama vectorial (Zijderveld) asociado, en el que se muestran simultáneamente, en dos planos, las componentes horizontal y vertical de la magnetización durante el proceso de desmagnetización. Panel derecho: curva de desmagnetización, la cual muestra la intensidad de la remanencia en función del campo aplicado.

dante el uso de *splines cúbicos* (curva definida en porciones mediante polinomios de tercer grado), siguiendo un modelo jerárquico y ventanas móviles para los polos con promedio de 100 años (Barbetti 1977; Lanos *et al.* 2005); y es actualizada de manera continua, tratando de cubrir un mayor número de sitios y temporalidades. Mediante el uso del programa *Rendate* (Lanos y Dufresne 2008), el cual utiliza estadística bayesiana, se obtuvieron los intervalos de coincidencia con un 95% de confiabilidad.

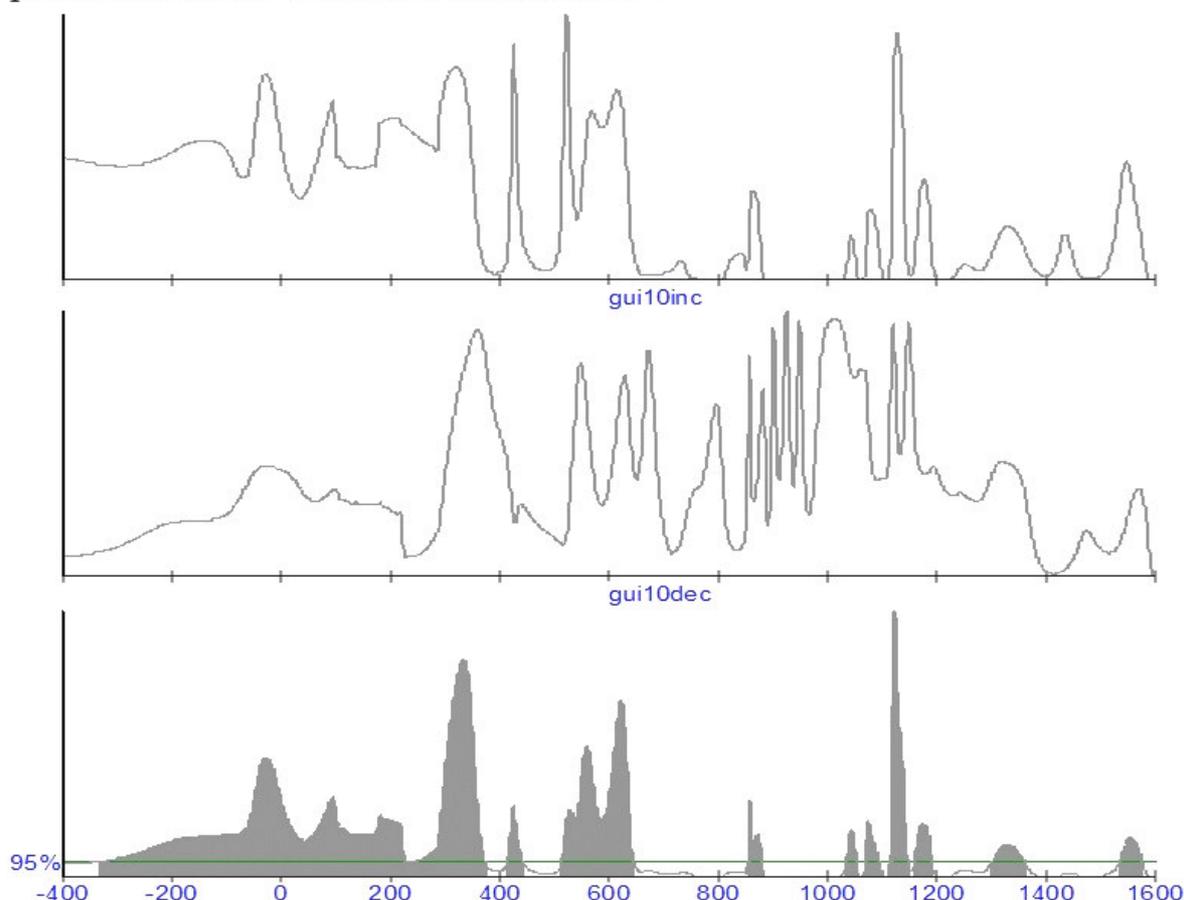
## METODOLOGÍA

Cada espécimen se obtuvo por la adhesión del material a estudiar a un cilindro de madera, el cual fue orientado *in situ* con una brújula Brunton (fig. 1). En la figura 2 se localizan los sitios de recolec-

ción de las muestras. Los 81 especímenes fueron desmagnetizados por campos alternos en las instalaciones del Laboratorio de Paleomagnetismo de la UNAM (Ciudad de México y Unidad Morelia), y procesados con el programa *Remasoft v.3.0* (Chadima y Hroudá 2006). La dirección media se obtuvo por medio de estadística de Fisher.

Para caracterizar la mineralogía magnética de los materiales analizados en esta investigación se realizaron estudios de propiedades magnéticas en todos los especímenes: determinaciones de susceptibilidad magnética ( $\kappa$ ) y de anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS, por sus siglas en inglés), utilizando un puente de susceptibilidades *Kappabridge KLY3*, así como ciclos de histéresis y adquisición de curvas de magnetización remanente isothermal (IRM, por sus siglas en inglés) mediante un magnetómetro *Micromag*.

A) Intersecciones entre la dirección media y la curva de variación secular para la muestra Gu10, usando Rendate.



B) Dirección media e intersecciones probables para la muestra Gu10.

Muestra	N	Dec (3°)	Inc (°)	$\alpha_{95}$	k	R	Intersecciones probables con el 95% de confianza entre dirección media y Curva de Variación Secular en Rendate
Gu10	8	349.5	40.2	10.8	16.76	7.582	[-331 ; 225] [228 ; 372] [414 ; 442] [514 ; 644] [855 ; 879] [1035 ; 1051] [1070 ; 1094] [1116 ; 1146] [1161 ; 1191] [1302 ; 1360] [1535 ; 1575]

Figura 3. A) Intersección de la dirección media con la CVS para la muestra G10, obtenida con Rendate. Las intersecciones están representadas por las áreas grises. B) Dirección media e intervalos de intersección con la curva de variación secular para la muestra Gu10, obtenidos con Rendate. Se observa el número de especímenes (N), la declinación e inclinación medias, los parámetros estadísticos  $\alpha_{95}$ , k y R, así como los intervalos donde dicha dirección se interseca con la *curva de variación secular*, con probabilidad al 95% de confianza de que dicha dirección sea la del campo magnético en el pasado. Debido a la naturaleza del campo magnético de la Tierra, puede haber más de una posible.

## DATACIÓN ARQUEOMAGNÉTICA

Las temporalidades para cada muestra fueron estimadas al determinar los intervalos de intersección entre la CVS y los valores de declinación e inclina-

ción medias determinadas en cada muestra por medio del *software Rendate*, con un intervalo de confianza del 95%.

Una vez determinadas las temporalidades, que pueden ser más de una, se seleccionó la más proba-

Tabla 1. *Dataciones arqueomagnéticas en Guachimontones de Teuchitlán.* Se observa la identificación de la muestra, el número N de especímenes que la conforman, la dirección de magnetización expresada como declinación (Dec) e inclinación (Inc), los parámetros estadísticos  $\alpha_{95}$ , k y R para cada determinación, así como la localización y datación arqueomagnética para cada muestra de Guachimontones de Teuchitlán. El signo menos en la datación arqueomagnética significa a. C.

Muestra	N	Dec (°)	Inc (°)	$\alpha_{95}$	k	R	Localización	Datación Arqueomagnética
Gu1 y Gu2	9	347.7	29.9	3.4	139.4	8.943	Estructura 3, La Joyita B, Guachimontones	[-117 ; -112]
Gu3	4	354.9	46.5	8.13	74.8	3.96	Fogón, La Joyita A, Guachimontones	[-248 ; -77]
Gu4	4	358.7	36.6	3.85	234.3	4.983	Piso quemado, Estructura 8, Círculo 2, Guachimontones	[-100 ; -113]
Gu5	4	8	24.3	8.2	73.79	3.959	2º muro Estructura 7, Círculo 1, Guachimontones	[683 ; 771]
Gu6	7	4.2	28.3	8.8	29.39	6.796	3er muro Estructura 7, Círculo 1, Guachimontones.	[682 ; 758]
Gu7	7	351.6	15.4	7.3	41.98	6.857	1er muro Estructura 7, Círculo 1, Guachimontones.	[751 ; 820]
Gu8	3	329.2	55.8	5.17	319.6	2.994	Plataforma 2, Círculo 1, Guachimontones	[116 ; 175]
Gu9	5	354	36.4	5.39	120.4	4.967	Plataforma A, Círculo 7, Guachimontones	[-100 ; 224]
Gu10	8	349.5	40.2	10.8	16.76	7.582	Apisonado central interno de Círculo B, Loma Alta	[97 ; 372]
Gu11	6	13.2	48.7	8.73	5.866	37.29	Horno Central, Juego de Pelota NW, Guachimontones	[427 ; 523]
Gu12	5	5.5	29.7	12.9	21.63	4.815	Piso quemado, Juego de Pelota 2 NW, Guachimontones	[50 ; 308]
Gu13	6	358.8	46.5	6.8	59.67	5.916	Horno grande, Talleres, Guachimontones	[556 ; 625]
Gu14	3	5.6	40.0	8.16	129.372	2.984	Horno grande, Talleres, Guachimontones	[559 ; 621]
Gu15	6	353.7	32.0	4.4	143.2	5.965	Horno grande, Talleres, Guachimontones	[530 ; 575]
Gu16	4	13.5	47.4	9.285	50.06	3.94	Apisonado externo interno del Círculo B, Loma Alta	[97 ; 218]

ble tomando en consideración el contexto arqueológico, las etapas constructivas o las dataciones de radiocarbono disponibles, obteniendo finalmente la datación arqueomagnética.

Las temporalidades obtenidas fueron comparadas con el modelo global de armónicos esféricos *Arch3k* (Donadini *et al.* 2009), el cual incluye datos mundiales de flujos de lava y muestras arqueológicas, corroborándose los resultados.

## RESULTADOS

La mayoría de las muestras mostraron una componente de magnetización unidireccional, con un buen agrupamiento,  $\alpha_{95} < 10^\circ$  y valores de *k* altos (tabla 1). En la figura 3 se muestra la dirección media para la muestra Gu10 y su intersección con la CVS utilizando *Rendate*. Las dataciones arqueomagnéticas de Guachimontones de Teuchitlán se pre-

Etapa	Formativo Temprano	Formativo Medio	Formativo Tardío	Clásico Temprano	Clásico Medio	Epiclásico	Postclásico Temprano	Postclásico Tardío
Fase	El Opeño	San Felipe	El Arenal	Ahuanulco	Teuchitlán I	Teuchitlán II	Sta. Cruz de B.	Etzatlán
Edad	-1500 ; -1000	-1000 ; -300	-300 ; 200	200 ; 400	400 ; 700	700 ; 900	900 ; 1250	1250 ; contacto
Muestra Arqueo-magnética			Gu3 Gu1 y Gu2 Gu4 Gu9 Gu8 Gu12 Gu10	Gu12 Gu16 Gu10 Gu11	Gu11 Gu15 Gu14 Gu13	Gu6 Gu5 Gu7		

Figura 4. Dataciones arqueomagnéticas en la cronología de Guachimontones de Teuchitlán (modificado de Weigand *et al.* 2008). Se observan las muestras Gu1 a Gu16 en los periodos del sitio.

sentan en la tabla 1. A partir de los estudios de propiedades magnéticas, se identificó la titanomagnetita como el mineral portador de la magnetización, con tamaño de grano compatible con el de los dominios magnéticos seudosencillos (PSD). Todas las muestras presentan fábrica magnética propia de la roca sedimentaria.

La dirección media de cada muestra se comparó con el modelo global *Arch3k*, obteniéndose en general una buena coincidencia, a excepción de la muestra Gu8 que no coincide en declinación e inclinación, así como la muestra Gu3 en inclinación.

## DISCUSIÓN

Las muestras Gu1 y Gu2 pertenecen a La Joyita B, uno de los sectores más antiguos de Guachimontones, por lo que la datación arqueomagnética de [-117; -112] es coherente con el sitio.

La muestra Gu3, tomada en La Joyita A, registra el último uso habitacional de esta área, determinado entre [-248; -77]. Para este contexto se tiene una datación de radiocarbono correspondiente a edades tempranas: [-387; -351], [-314; -310], [-298; -230] y [-219; -208], datación correspondiente a muestras encontradas en el fogón que puede ser más joven que la última utilización del fogón.

La muestra Gu4 corresponde a un piso quemado de la Estructura 8 del Círculo 2, el intervalo de intersección obtenido con la *curva de variación secular* es [-400; 113], pero el contexto arqueológico indica que el inicio de la construcción del Círculo 1, Círculo 2 y Juego de Pelota fue alrededor del año

-100 (100 a. C.), por lo que buena parte del intervalo no corresponde a la etapa constructiva. Por esta razón, la datación arqueomagnética se acorta a [-100; 113]. La razón de que el rango de intersección con la curva sea tan grande se debe a la naturaleza de la *curva de variación secular*, es decir, tenemos poca resolución por la falta de datos en esta temporalidad temprana.

Las dataciones arqueomagnéticas de Gu5, Gu6 y Gu7 son cercanas, lo que indica su contemporaneidad y dan certeza al estudio porque estas tres muestras son parte de una misma estructura: corresponden a las paredes 1, 2 y 3 de la Plataforma 7. Para esta estructura existe una determinación de radiocarbono de una ofrenda en el interior de la plataforma, datada entre [-41; -9] y [-2; 60], correspondiente a las primeras etapas constructivas hacia -100 (100 a. C.), y las paredes fueron construidas 700 años después. Se sabe que la finalización de la arquitectura monumental del Círculo 1 fue alrededor del año 100 (100 d. C.), pero Weigand encontró en el anfiteatro, cercano a la Plataforma 7, cerámica tipo *seuso-cloisonné* datada entre [450; 900] (Beekman 2010). Las edades de las paredes de la Plataforma 7 [683; 771], [682; 758] y [751; 820] registran una modificación arquitectónica de la plataforma confirmando la reocupación del sitio.

La muestra Gu8 fue tomada en la Plataforma 2 del Círculo 1 y la datación arqueomagnética confirma lo que se sabía del sitio: la consolidación de estas estructuras fue en [116; 175]. Existe una datación por radiocarbono de un otate asociado a esta estructura y las edades estimadas son [82; 107],

[114; 180] y [190; 215]. Se observa correspondencia con nuestro resultado.

La datación de la muestra Gu9, tomada en la Plataforma A del Círculo 7, tiene un rango de intersección con la curva de variación secular de [-300; 224], que no concuerda con la fase constructiva del sitio debido probablemente a la carencia de datos en etapas tempranas. Basándose en el contexto arqueológico, el periodo puede ser reducido a [-100; 224], pero es necesaria una edad de radiocarbono para estas estructuras con el fin de confirmar el periodo de ocupación.

Las muestras Gu10 y Gu16 corresponden a suelos compactados en el interior del Círculo B de Loma Alta, área circundante que fue construida después de la nuclear. Estos suelos compactos fueron creados sin exposición al calor ni consolidados con algún otro material. Garantizamos nuestras dataciones con  $\alpha_{95} < 10^\circ$  y por AMS sabemos que la adquisición de magnetización fue sedimentaria. El periodo obtenido de [67; 229] corresponde a un año después del periodo constructivo del año 100.

Las muestras Gu11 a Gu15 provienen del área circundante a Guachimontones, donde ahora se encuentra el Centro Interpretativo «Phil Weigand». En esta zona hay 5 hornos y un Juego de Pelota correspondientes a una posttemporalidad de Guachimontones y representa una posterior ocupación de la tradición Teuchitlán cerca del Clásico Tardío.

Gu11 proviene de un horno central a la mitad del Juego de Pelota 2 NW y su datación arqueomagnética es [427; 523], confirmando la cronología del sitio hacia el Clásico Tardío, después del Guachimontones de la tradición de Teuchitlán.

Gu12 es un piso quemado en la cabeza del juego de pelota. Como la construcción del sitio se inició alrededor de los años 50 y 100 d. C. y la intersección con la curva es [-420; 308], el límite inferior puede fijarse en el año 50 y el resultado de la datación es [50; 308], mostrando actividad después del comienzo de la ocupación.

Gu13, Gu14 y Gu15 son muestras tomadas en tres secciones de un horno gigante. Debido a que las muestras son quemadas, presentan  $\alpha_{95} < 5^\circ$ . Las respectivas dataciones arqueomagnéticas [556; 625], [552; 629] y [530; 575] representan el último uso del horno. Estos resultados confirman la reocupación del sitio durante el Clásico Tardío. Las

dataciones arqueomagnéticas realizadas en Guachimontones de Teuchitlán y áreas adyacentes confirman la cronología del sitio y proporcionan nuevos registros a la arqueología del Occidente prehispánico de México (fig. 4). Dos nuevas direcciones, Gu3 y Gu8, podrán ser incluidas en la *curva de variación secular* porque tienen dataciones de radiocarbono asociadas.

## CONCLUSIONES

Las muestras presentaron direcciones con el 88% de los casos concordantes con los periodos de ocupación y las dataciones de radiocarbono disponibles. Solo 2 muestras presentaron  $\alpha_{95} > 10^\circ$ , Gu10 y Gu12 con  $10.8^\circ$  y  $12.9^\circ$ ; se reportan porque sus dataciones corresponden a su posición estratigráfica. El estudio de propiedades magnéticas indica la presencia de titanomagnetitas como principal mineral portador de la magnetización y una fábrica sedimentaria en todas las muestras quemadas y no quemadas.

La comparación de dataciones obtenidas mediante la curva modificada de Soler-Arechalde *et al.* (2006) con el modelo *Arch3k* es muy satisfactoria, ya que solo la muestra Gu8 no coincide con el modelo; esto no puede atribuirse a un error en la determinación de magnetización de la muestra ( $\alpha_{95} = 5.3^\circ$ ), sino a la falta de datos en la *curva de variación secular* para esta región de México.

Las direcciones arqueomagnéticas de las muestras Gu3 y Gu8 pueden anexarse a la *curva de variación secular* de Mesoamérica debido a que son coincidentes con las dataciones de radiocarbono reportadas. Con estas edades confirmadas por otro método, es posible mejorar la resolución de la curva para las edades [-248; -77] y [116; 175], y contribuir a los modelos globales como el *Arch3k*.

Los resultados de este estudio apoyan la hipótesis de Weigand *et al.* (2008) sobre una reocupación del sitio en el Epiclásico. Esto representa una contribución importante a la cronología de la ocupación de Guachimontones.

Las dataciones obtenidas en Guachimontones son también una relevante aportación para entender el desarrollo cultural del Occidente de México.

## Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada financieramente por el proyecto CONACYT n.º 252149 y, parcialmente, por UNAM-PAPIIT IN101717.

WOLFMAN, D. 1990. Mesoamerican chronology and archaeomagnetic dating, AD 1-1200. En *Archaeomagnetic Dating*, eds. J. L. Egihmy y R. S. Sternbeg, pp. 261-391. Tucson, Arizona: The University of Arizona Press.

## REFERENCIAS

- BARBETTI, M. 1977. Measurements of recent geomagnetic secular variation in southeast Australia and the question of dipole wobble. *Earth and Planetary Science Letters* 36: 207-218.
- BEEKMAN, C. 2010. Recent Research in Western Mexican Archaeology. *Journal of Archaeological Research* 18/1: 41-109.
- CHADIMA, M., F. HROUDA. 2006. Remasoft 3.0: a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Travaux Géophysiques* 27: 20-21.
- DONADINI, F., M. KORTE, C. G. CONSTABLE. 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka: 1. New data sets for global modeling. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10/6: Q06007. <http://doi.org/10.1029/2008GC002295>.
- HUEDA, Y., A. M. SOLER-ARECHALDE, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, L. BARBA, L. R. MANZANILLA, M. REBOLLEDO-VIEYRA, A. GOGUITCHAICHVILI. 2004. Archaeomagnetic studies in central México: Dating of Mesoamerican lime-plasters. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 147: 269-283.
- LANOS, P., M. LE GOFF, M. KOVACHEVA, E. SCHNEPP. 2005. Hierarchical modelling of archaeomagnetic data and curve estimation by moving average technique. *Geophysical Journal International* 160: 440-476.
- LANOS, P., P. DUFRESNE. 2008. Bayesian Archaeomagnetic and Radiocarbon dating: the RenDate software. En *Radiocarbon and Archaeology, 5th International Symposium*. Zurich, Suiza.
- SOLER-ARECHALDE, A. M., F. SÁNCHEZ, M. RODRÍGUEZ, C. CABALLERO-MIRANDA, A. GOGUITCHAICHVILI, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, L. MANZANILLA, D. H. TURLING. 2006. Archaeomagnetic investigation of oriented pre-Columbian lime-plasters from Teotihuacan, Mesoamerica. *Earth, Planets and Space* 58/10: 1433-1439.
- WEIGAND, P. C., C. BEEKMAN, R. ESPARZA, EDS. 2008. *Tradición Teuchitlán*. El Colegio de Michoacán y Secretaría de Cultura del Estado de Jalisco.

## FE DE ERRATAS

En la fig. 4 de la pág. 32, donde dice «Ahuanulco» debe decir «Ahualulco».

## RESEARCH ADVANCE

# COERCIVITY AND VECTOR MAGNETIZATION ANALYSIS OF OBSIDIAN SAMPLES FROM THE TRANS-MEXICAN VOLCANIC BELT

*Coercitividad y análisis de magnetización vectorial de muestras de obsidias de la faja volcánica transmexicana*

*Jaime Urrutia-Fucugauchi, Ligia Pérez-Cruz*

Laboratorio de Paleomagnetismo y Paleoambientes, Instituto de Geofísica, UNAM, Coyoacán, México



Figure 1. Schematic map of obsidian outcrop localities in the eastern, central and western sectors of the Trans-Mexican volcanic belt. Basemap: courtesy of NASA, JPL, Landsat Thematic Mapper.

**ABSTRACT.** *This note presents initial results of a paleomagnetic study of obsidian from twenty localities in the eastern, central and western sectors of the Trans-Mexican volcanic belt in central Mexico. We focus on the coercivity and vector composition of the remanent magnetization, which are critical for paleodirectional and paleointensity*

*studies. Alternating field demagnetization shows that obsidians carry single and two-component magnetizations residing in low- and high-coercivity magnetic minerals, with discrete and overlapping coercivity spectra. Magnetic minerals are likely iron-titanium oxides with fine-grain sizes characterized by pseudo-single domain states.*

*Recibido: 29-7-2017. Aceptado: 3-8-2017. Publicado: 10-8-2017.*

Edited & Published by Pascual Izquierdo-Egea. English proofreading by Emily Lena Jones.  
Arqueol. Iberoam. License CC BY 3.0 ES. <http://purl.org/aia/354>.

**KEYWORDS:** *Mesoamerica, Obsidians, Magnetic properties, Paleomagnetic record.*

**RESUMEN.** *Se presentan los resultados preliminares del estudio de obsidianas de veinte localidades en los sectores este, central y oeste de la faja volcánica transmexicana. Los análisis se concentran en la coercitividad y la composición vectorial de la magnetización remanente, que son propiedades claves para evaluar los registros de direcciones e intensidades. La desmagnetización por campos alternos revela la presencia de magnetizaciones de una y dos componentes, que residen en minerales con baja y alta coercitividad con espectros que traslapan y discretos. Los minerales magnéticos son óxidos de hierro-titanio con grano fino y estados de dominio pseudosencillo.*

**PALABRAS CLAVE:** *Mesoamérica, obsidianas, propiedades magnéticas, registro paleomagnético.*

## INTRODUCTION

Archaeological research relies on different chemical, mineralogical and physical techniques, which are then incorporated into archaeological analyses. Archaeomagnetic studies provide information useful for dating and correlation, sourcing, site characterization and manufacturing techniques. Magnetic minerals can acquire a remanent magnetization under a range of conditions, including heating and cooling of volcanic rocks, ceramics and kilns, which record the direction and magnitude of the ambient magnetic field.

Lithic materials have been characterized using a wide range of analytical techniques over the past years. Magnetic properties show wide ranges over several orders of magnitude and have been successfully used for sourcing and characterization of obsidians (e.g. McDougall *et al.* 1983; Urrutia-Fucugauchi 1999; Vazquez *et al.* 2001; Frahm *et al.* 2013, 2014). Studies show that magnetic methods support the characterization of volcanic glasses in cases where they display similar macroscopic features, textures and chemical composition (Frahm *et al.* 2014).

Rapid cooling results in aphanitic textures with small grain sizes. Fine grained single domain and pseudo-single domain iron-titanium oxide particles are the most stable remanence carriers and are reliable recorders of the ambient magnetic field. Obsidians are potentially ideal recorders for paleodirectional and paleointensity studies (Ferk *et al.* 2011). Recent developments in the

reference secular variation curves, curve matching and statistical analyses and use of full-vector data are improving the resolution and precision of archaeomagnetic dating (e.g. Pavon-Carrasco *et al.* 2014; Urrutia-Fucugauchi *et al.* 2016). Incorporation of new materials like lime plasters, copper slags, mural paintings and obsidians opens new possibilities.

In this note we present results from an ongoing rock magnetic and paleomagnetic study of archaeological and geological obsidians from central Mexico (Fig. 1). Our study focuses on the magnetic properties and vectorial composition of the remanent magnetization, which are critical for assessing the paleodirectional and paleointensity records.

## SAMPLES AND METHODS

We analyzed thirty-eight obsidian samples from twenty sites in central Mexico, representing different geological settings and ages in the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB). Samples, selected from the laboratory collection (Urrutia-Fucugauchi 1999), originate from the following regions: eastern sector (Jacal, Pico de Orizaba, Altotonga, Veracruz, Guadalupe Victoria, Puebla, Zaragoza, Puebla and Atempa, Puebla), central sector (San Jose El Rincon, Zinapécuaro, Ucareo, Zinaparo, Los Azufres, Michoacan, Zacualtipan, Hidalgo, Cerro de las Navajas, Hidalgo and Buena Vista, Mexico) and western sector (Jocotepec Chapala, Jalisco, Volcan Colima 4 km and 8 km Magdalena, Tequila, Jalisco, Mesa de las Salvias, Jalisco, Primavera, Jalisco and Teuchitlan, Nayarit).

The samples display different macroscopic properties, ranging from the green obsidians from the Cerro de las Navajas, Hidalgo to the gray (Zaragoza, Puebla), dark gray (Zinaparo, Michoacan), dark brown (Altotonga, Veracruz) and black (Zacualtipan, Hidalgo) of other sites. They appear macroscopically fresh, although further analyses are underway to identify alterations. Major and trace element chemistry of obsidian has been investigated in different studies, which have focused on similarities and differences for characterization and sourcing (Jimenes-Reyes *et al.* 2001).

In this study, we used the alternating field (AF) demagnetization technique. AF demagnetization involved 10–12 steps up to maximum fields of 100 mT in a Molspin AF tumbling demagnetizer. The intensity and direction of the natural remanent magnetization (NRM) were measured with a spinner magnetometer.

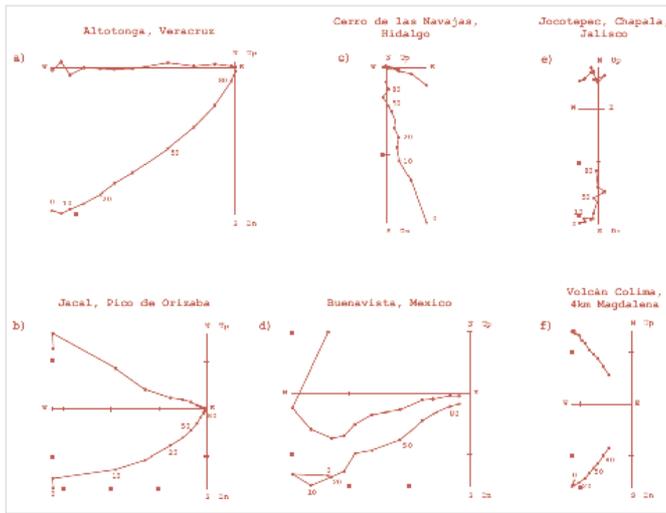


Figure 2. Alternating field demagnetization of natural remanent magnetization plotted in Zijderveld vector diagrams. Symbols: circles indicate horizontal plane and crosses indicate vertical plane. Numbers indicate some of the applied fields in mT.

Samples were unoriented and NRM directions were plotted in sample coordinates. Directions were analyzed using Zijderveld vector plots and great-circle and end-point analysis. NRM intensities were displayed in normalized intensity diagrams. The Median Destructive Field (MDF), an applied field that results in a reduction of 50% of the initial NRM intensity, was used as

a rough estimate of the coercivity. MDF is biased in the case of low coercivity overprints, which here resulted in a sharp initial decay of remanent intensity. Other estimates of coercivity were provided by the percentage intensity remaining after 100 mT demagnetization step or the applied field required to reduce the intensity to 10% of the initial NRM intensity.

Magnetic susceptibility was measured in low-fields with the Bartington MS2 meter equipped with the laboratory dual-frequency sensor at low and high frequencies. Further analyses of the coercivity and magnetization involved measuring the magnetic hysteresis, acquisition of isothermal remanent magnetization (IRM) and back-field demagnetization of saturation IRM using the Micromag instrument. Domain states were analyzed using the magnetization ( $M_r/M_s$ ) versus coercivity ( $B_{cr}/B_c$ ) ratio plot (Day *et al.* 1977; Dunlop 2002).

### MAGNETIC PROPERTIES

AF demagnetization results show mostly single-component magnetizations with low-coercivity secondary overlaps as well as two-component magnetizations with discrete or overlapping coercivity spectra. Examples of vector plots and normalized magnetization intensity diagrams for sites in eastern, central and western TMVB

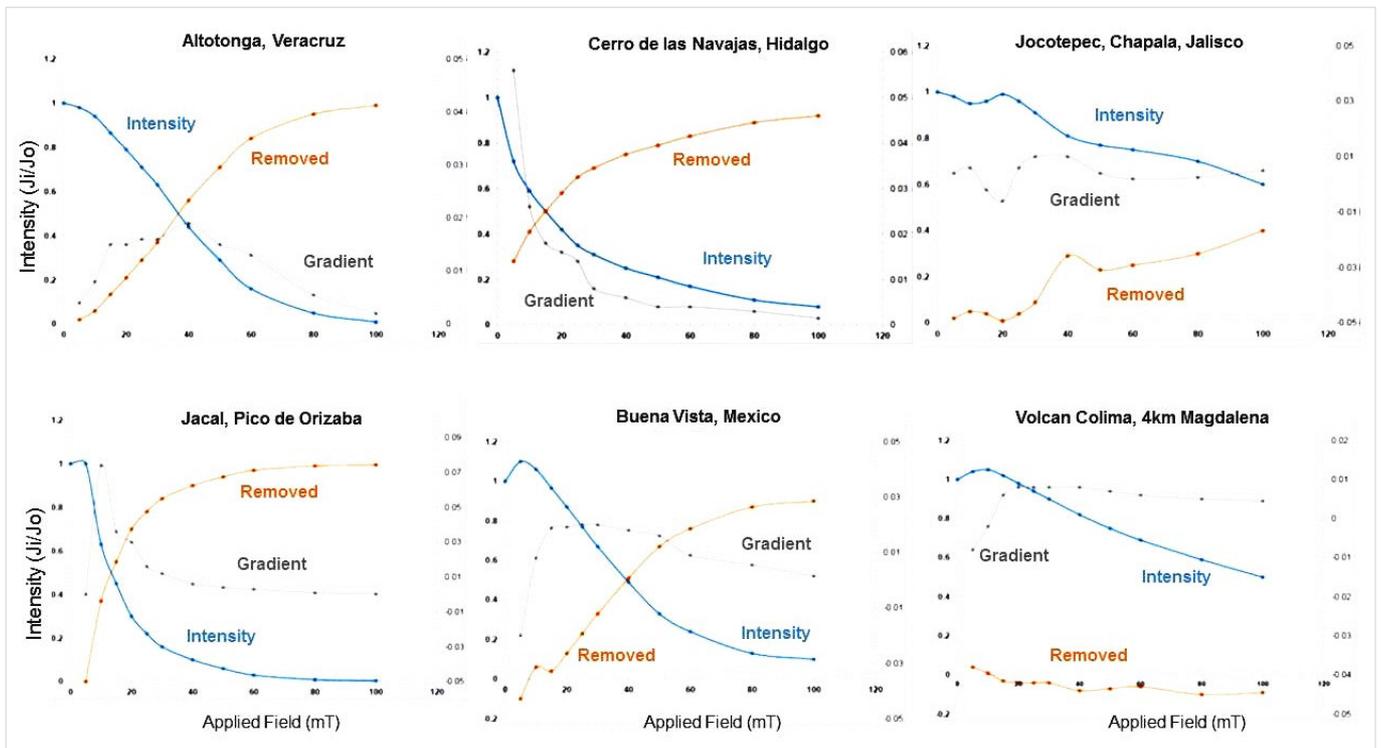


Figure 3. Normalized intensity diagrams for alternating field demagnetization. Curves indicate the intensity remaining after given applied field step, intensity removed and gradient of remaining intensity curve.

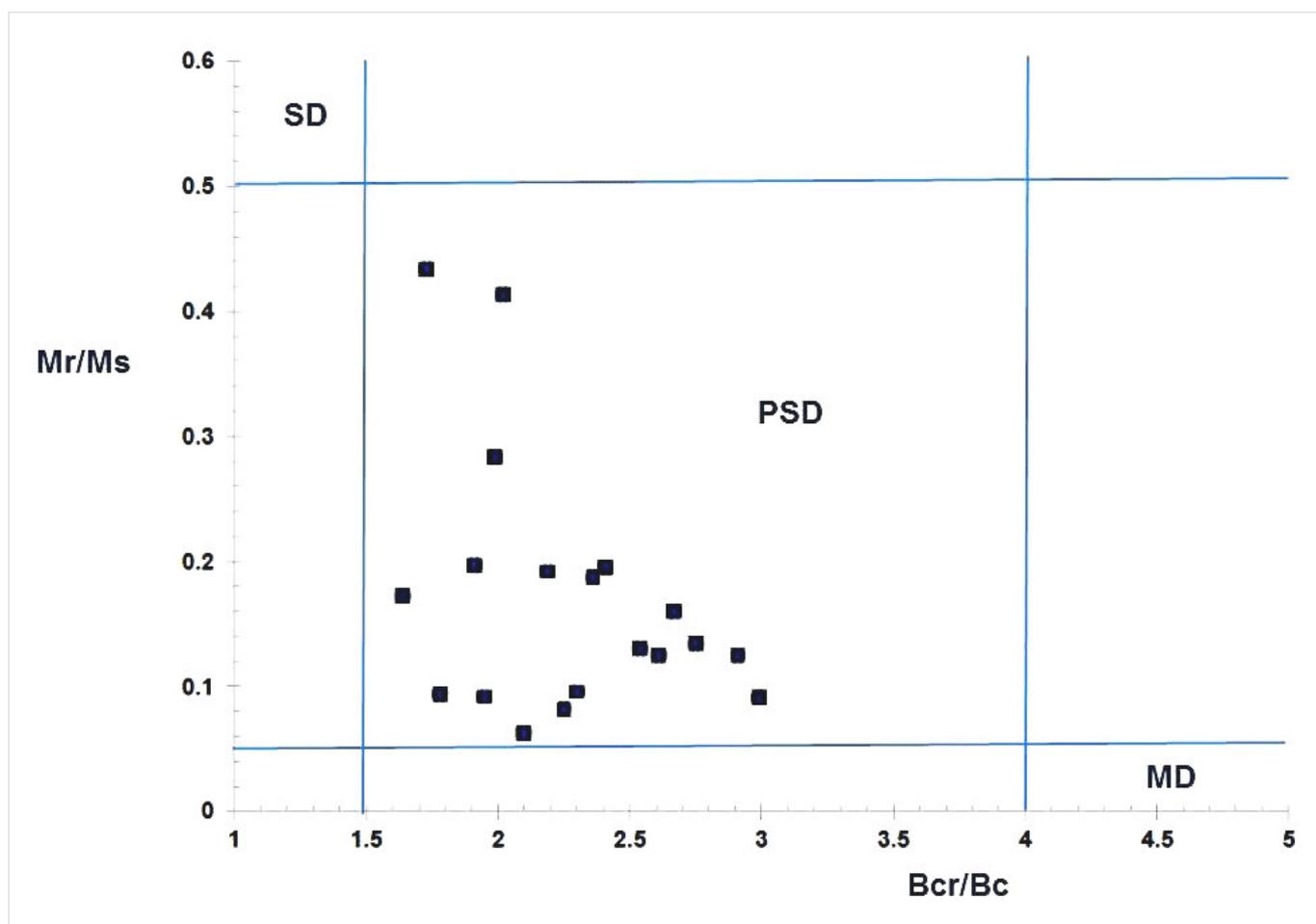


Figure 4 Magnetic hysteresis data plotted in the Mr/Ms versus Bcr/Bc ratios Day diagram with the domain state fields: SD (single domain), PSD (pseudo-single domain) and MD (multidomain).

sectors are shown in Figures 2 and 3, respectively. The obsidians from Jacal, Pico de Orizaba, Altotonga, Veracruz, Buena Vista, Mexico and Cerro de las Navajas, Hidalgo show magnetizations with low to intermediate coercivities. The obsidians from Jacal and Buena Vista are characterized by univectorial magnetizations with low-coercivity secondary components. Obsidians from Altotonga and Cerro de las Navajas show two-component magnetizations with partly overlapping coercivity spectra. Samples from Jocotepec, Chapala and Volcan Colima 4 km Magdalena show intermediate to high coercivities; though they are characterized by univectorial magnetizations with small secondary components. Obsidians from the Jocotepec and Volcan Colima localities show intermediate MDF fields around 40 mT and MDF fields above 100 mT.

Samples plot in the pseudo-single domain field in the Day plot (Fig. 4). The Mr/Ms and Bcr/Bc ratios vary from  $\sim 0.06$  to  $\sim 0.4$  and from  $\sim 1.64$  to  $\sim 2.75$ , respectively. The low-field magnetic susceptibility ranges from diamagnetic up to  $250 \cdot 10^{-5}$  SI. Remanent Mr

intensities range from  $\sim 0.3$  to  $\sim 84$  nA/m<sup>2</sup> and Hcr coercivities range from  $\sim 12$  to  $\sim 80$  mT.

## DISCUSSION

Obsidians are ideal magnetic recorders due to their rapid cooling and the presence of fine-grained single domain iron-titanium oxide minerals in their glassy matrixes. Studies show that obsidians preserve accurate high-precision paleointensity records and that both cooling rate and anisotropy effects can be determined and corrected (Ferk *et al.* 2011). Alterations during hydration, devitrification and perlitization may affect the magnetic stability, grain size and domain states, resulting in overprinting of the paleomagnetic record.

The preliminary results presented here show a wide range of paleomagnetic behaviors, with presence of mostly single but also two-component magnetizations residing in low- and high-coercivity magnetic minerals (Figs. 2 and 3). Two-component magnetizations are

characterized by discrete and overlapping coercivity spectra. For sites with two or three samples, internal variability was examined. In some locations, the coercivity and vectorial composition of magnetization showed internal variability, with single and two-component magnetizations residing in intermediate and high coercivity minerals. In samples from Jocotepec, Chapala, MDF fields varied from intermediate 40 mT fields up to high coercivities with more than 50% of initial remanence remaining after 100 mT demagnetization. At Jacal, Pico de Orizaba, samples show single and two-component magnetizations with overlapping coercivity spectra.

Constraining the magnetic carriers of obsidians has not been easy, and detailed micromagnetic and microstructural analyses are needed to characterize the fine-grained magnetic fractions as well as impurities and alterations. Zanella *et al.* (2012) used magnetic susceptibility, anhysteretic susceptibility and room and liquid-nitrogen temperature IRM to determine grain size variations, showing the usefulness of these techniques for obsidian sourcing.

Ferk *et al.* (2011) documented alterations resulting from heating in the paleointensity experiments; in their study, high paramagnetic mineral contents made difficult the characterization of magnetic carriers, which were likely fine-grained single domain minerals. Obsidians are clearly reliable materials for paleointensity studies, as shown by the high experimental quality data and tests with synthetic materials under laboratory conditions.

## CONCLUSIONS

Mesoamerican cultures made use of a wide range of lithic materials and developed extensive networks for resources procurement and trade. Studies have documented the developments in extraction and manufacturing techniques and the extent of trade networks across far-away regions. Mesoamerica is characterized by active volcanism: in the volcanic provinces of the TMVB, the Chiapanecan arc and the Central American arc, volcanic products were readily available and were used in construction, in monuments, and for tools. Among these products, obsidian became an important material with diverse uses, and was highly valued in trade. Characterization and sourcing of obsidian are thus critical components of Mesoamerican archaeology (Cobean 2002).

Alternating field demagnetization on a suite of obsidian samples from twenty localities in central Mexico shows single- and two-component magnetizations residing in low- and high-coercivity magnetic minerals, characterized by discrete and overlapping coercivity spectra. Magnetic minerals are likely iron-titanium oxide minerals with fine-grain sizes and pseudo-single domain states. The paleomagnetic record of obsidians appears more complex than expected from the rapid cooling, aphanitic textures and relatively homogeneous iron-titanium oxide mineral assemblages.

## Acknowledgments

We acknowledge the technical assistance by Victor Macias, Miguel Angel Diaz, Mariana Marca and Martin Espinosa.

## About the authors

JAI ME URRUTIA-FUCUGAUCHI (*juf@geofisica.unam.mx*), Professor, Geophysical Institute, UNAM, Mexico City.

LIGIA PÉREZ-CRUZ (*perezacruz@geofisica.unam.mx*), Professor and Chair, Department of Geomagnetism and Geophysical Exploration, UNAM, Mexico City.

## REFERENCES

- COBEAN, R.H. 2002. *A World of Obsidian: The Mining and Trade of Volcanic Glass in Ancient Mesoamerica*. Mexico: INAH and University of Pittsburgh Press.
- DAY, R., M. FULLER, V.A. SCHMIDT. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 13: 260–7.
- DUNLOP, D.J. 2002. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc). 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research* 107/B3: EPM4-1-4-22.
- FERK, A., R. LEONHARDT, K.U. HESS, D.B. DINGWELL. 2011. Paleointensities on 8 ka obsidian from the Mayor Island, New Zealand. *Solid Earth* 2: 259–70.
- FRAHM, E., J.M. FEINBERG. 2013. From flow to quarry: magnetic properties of obsidian and changing scales of archaeological sourcing. *Journal of Archaeological Science* 40: 3706–21.

- FRAHM, E., J.M. FEINBERG, B. SCHMIDT-MAGEE, B. GASPARYAN, B. YERYTSYAN, S. KARAPETIAN, K. MELIKSE-TIAN, M. MUTH, D.S. ADLER. 2014. Sourcing of geochemically identical obsidian: multiscalar magnetic variations in the Gutansar volcanic complex and implications for Palaeolithic research in Armenia. *Journal of Archaeological Science* 47: 164–78.
- JIMENEZ-REYES, M., D. TENORIO, J.R. ESPARZA-LOPEZ, R.L. CRUZ-JIMENEZ, C. MANDUJANO, S. ELIZALDE. 2001. Neutron activation analysis of obsidians from quarries of the central Quaternary Trans-Mexican volcanic belt. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 250: 465–71.
- MCDUGALL, J.M., D.H. TARLING, S.E. WARREN. 1983. The magnetic sourcing of obsidian samples from Mediterranean and Near Eastern Sources. *Journal of Archaeological Science* 10: 441–52.
- PAVON-CARRASCO, J., M. OSETE, J.M. TORTA, A. DE SANTIS. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters* 388: 98–109.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. 1999. Preliminary results of a rock-magnetic study of obsidians from central Mexico. *Geofísica Internacional* 38: 83–94.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., A. GOGUITCHAICHVILI, L. PÉREZ-CRUZ, J. MORALES. 2016. Archaeomagnetic dating of the eruption of Xitle volcano, basin of Mexico: Implications for the Mesoamerican centers of Cuicuilco and Teotihuacan. *Arqueología Iberoamericana* 30: 23–29.
- VAZQUEZ, C.A., H.G. NAMI, A.E. RAPALINI. 2001. Magnetic sourcing of obsidians in southern South America: Some successes and doubts. *Journal of Archaeological Science* 28: 613–8.
- ZANELLA, E., E. FERRARA, L. BAGNASCO, A. OLLA, R. LANZA, C. BEATRICE. 2012. Magnetite grain-size analysis and sourcing of Mediterranean obsidians. *Journal of Archaeological Science* 39: 1493–8.

RESEARCH ADVANCE

**APORTES A LA CRONOLOGÍA ABSOLUTA DE LA ESTANCIA  
JESUÍTICA DE ALTA GRACIA (CÓRDOBA, ARGENTINA):  
ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO DE LA BALDOSA DE  
LA PARROQUIA NUESTRA SEÑORA DE LA MERCED**  
*Contributions to the Absolute Chronology of the Jesuit Mission of  
Alta Gracia (Cordoba, Argentina): An Archaeomagnetic Study  
of a Tile from the Parish of Nuestra Señora de la Merced*

***Claudia Gogorza,<sup>1</sup> Carlos A. Page,<sup>2</sup> Avto Goguitchaichvili,<sup>3</sup>  
Catriel Greco,<sup>4</sup> Juan Morales,<sup>3</sup> Augusto Rapalini<sup>5</sup>***

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN, UNCPBA-CICPBA-CONICET), Tandil, Argentina; <sup>2</sup> Centro de Investigaciones y Estudios sobre Cultura y Sociedad del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (CIECS-CONICET/UNC); <sup>3</sup> Servicio Arqueomagnético Nacional y Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México; <sup>4</sup> Universidad de San Luis, CONICET, Argentina; <sup>5</sup> Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales (IGEBA, UBA-CONICET)



Figura 1. Vista general de la parroquia Nuestra Señora de la Merced.

*Recibido: 21-8-2017. Aceptado: 31-8-2017. Publicado: 7-9-2017.*

Edited & Published by Pascual Izquierdo-Egea. English proofreading by Michelle Young.  
Arqueol. Iberoam. License CC BY 3.0 ES. <http://purl.org/aia/355>.

**RESUMEN.** Este trabajo tiene como objetivo datar por medio del estudio magnético las baldosas de la parroquia Nuestra Señora de la Merced de la ciudad de Alta Gracia (Córdoba, Argentina), lamentablemente levantadas en 2012, con la finalidad de aportar a la cronología absoluta de la estancia jesuítica, declarada por la UNESCO Patrimonio de la Humanidad en 2000. El intervalo de edad obtenido (1780-1806) por medio del método arqueomagnético, usando el modelo global de predicción de campo geomagnético SHA.DIF.14k, corresponde a la etapa de administración de los Rodríguez (1772-1809), inclinándonos hacia el periodo de administración de José Rodríguez y su hijo Manuel, ya que el inmueble fue alquilado después. Es decir, que es improbable que la colocación de las baldosas se llevara a cabo durante el periodo jesuita ni tampoco que ocurriera durante la corta estadía del virrey Santiago de Liniers en los primeros meses de 1810.

**PALABRAS CLAVE:** arqueomagnetismo, Argentina, estancias jesuíticas, Córdoba, datación absoluta.

**ABSTRACT.** This work aims to date the tiles of the parish of Nuestra Señora de la Merced in the city of Alta Gracia (Cordoba, Argentina) using a magnetic methodology. Our objective was to contribute to the absolute chronology of the Jesuit Mission in this region, declared a UNESCO World Heritage site in 2000. The age interval (1780–1806) was obtained by means of the archeomagnetism using the SHA.DIF.14k geomagnetic field prediction model. This age corresponds to the stage of the Rodriguez administration (1772–1809), in particular the period of Jose Rodriguez and his son Manuel, since later the property was rented out. In other words, it is unlikely that the tiles were laid during the Jesuit period or during the short stay of the viceroy Santiago de Liniers in the early months of 1810.

**KEYWORDS:** Archaeomagnetism, Argentina, Jesuit Missions, Cordoba, Absolute dating.

## INTRODUCCIÓN

El arqueomagnetismo es el estudio de cambios y variaciones del campo magnético terrestre en el pasado histórico y geológico 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 el 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, sin embargo, 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.

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 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, en el arqueomagnetismo 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. 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 anteriormente, se podrían datar las distintas exposiciones al fuego, aunque cuando la última temperatura es más alta borra las señales previas.

Si bien 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 analizado 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 (Gogorza *et al.* 2011).

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 que va desde mediados del siglo XVI hasta principios del 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 Argentina, desde hace unos años, se comenzó un programa de análisis de intensidad magnética de objetos históricos y arqueológicos dentro del Servicio Arqueomagnético Nacional 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 y 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 entre los años 1640 y 730 antes del presente (AP)), 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.

Por otro lado, del poblado prehispánico de Rincón Chico (valle de Santa María, Catamarca, Argentina), que fuera ocupado entre el siglo X y la conquista española, se obtuvieron resultados de intensidad para 25 fragmentos de cerámica, cuya cronología se contextualizó a partir del estudio tipológico y de 36 dataciones de radiocarbono (Goguitchaichvili *et al.* 2011). Estos resultados son una importante contribución a la conformación de una curva de variación secular de la intensidad magnética para la región. El presente trabajo tiene como objetivo datar por medio del estudio magnético la baldosa de la parroquia Nuestra Señora de la Merced de la ciudad de Alta Gracia (Córdoba, Argentina), con la finalidad de aportar a la cronología absoluta de la estancia jesuítica en la región.

## LA ESTANCIA JESUÍTICA DE ALTA GRACIA Y SU IGLESIA

Los jesuitas tuvieron un rol protagónico en el desarrollo de la Argentina rural pero no exclusivo. De igual manera, consideramos que su labor fue importante, sobre todo en Córdoba donde surgió ese activo polo de irradiación cultural que significó la Universidad, quedando reflejada en una serie de monumentos de altos significados que modificó el ambiente natural. Una de las estancias de mayor importancia fue la de Alta Gracia, ubicada en la región del valle que los naturales llamaron Paravachasca, del actual departamento Santa María. Hoy es una pequeña y próspera ciudad frente a cuya plaza principal se eleva el casco de la histórica estancia, quedando ubicada a 40 kilómetros al sudeste de la ciudad de Córdoba.

La posesión de la tierra, incluyendo la actividad ganadera y la agrícola, aseguró a los jesuitas desde el siglo XVII un crecimiento sostenido hasta su expulsión. En Alta Gracia, de acuerdo con las observaciones que realizó el Dr. Daniel Schávelzon sobre las piezas recogidas en las excavaciones de algunos sectores de los edificios, es evidente la existencia de un horno para cocer cerámica. También se encontraban hornos de quemar tejas y ladrillos; mientras que «a distancia de media legua» —como se inscribe en el inventario de la expulsión— se hallaba un horno de quemar cal con sus paredes de adobe. Todos estos materiales, confeccionados y enfriados desde altas temperaturas (mayores a 600 °C, se convierten en excelentes candidatos para los estudios arqueomagnéticos.

Entre las primeras construcciones de la estancia de Alta Gracia, los documentos históricos mencionan la existencia de una capilla muy precaria, probablemente edificada hacia 1654. Para 1715 se efectuaron varias reparaciones edilicias de importancia. Otros documentos mencionan el edificio del obraje pero también que «en Alta Gracia se ha construido una hermosa capilla con bóvedas de cal y ladrillo». Después, las obras continuaban con lentitud, figurando en el *Libro de Cuentas* de la estancia, en el asiento del mes de setiembre de 1733, que se trajeron 600 ladrillos para la construcción de la sacristía. El Padre Contucci anotaba en un memorial de 1760 que se han hecho para la fábrica de la capilla ciento veintiocho mil ladrillos y 1.300 fanegas de cal. Sin duda, es incuestionable el enorme valor arquitectónico pero también artístico de la iglesia. Martín Noel, discurriendo sobre el barroco jesuítico, escribe: «La que mejor refleja precisamente en su reducida



Figura 2. Interior de la parroquia Nuestra Señora de la Merced con la fotografía de la baldosa analizada.

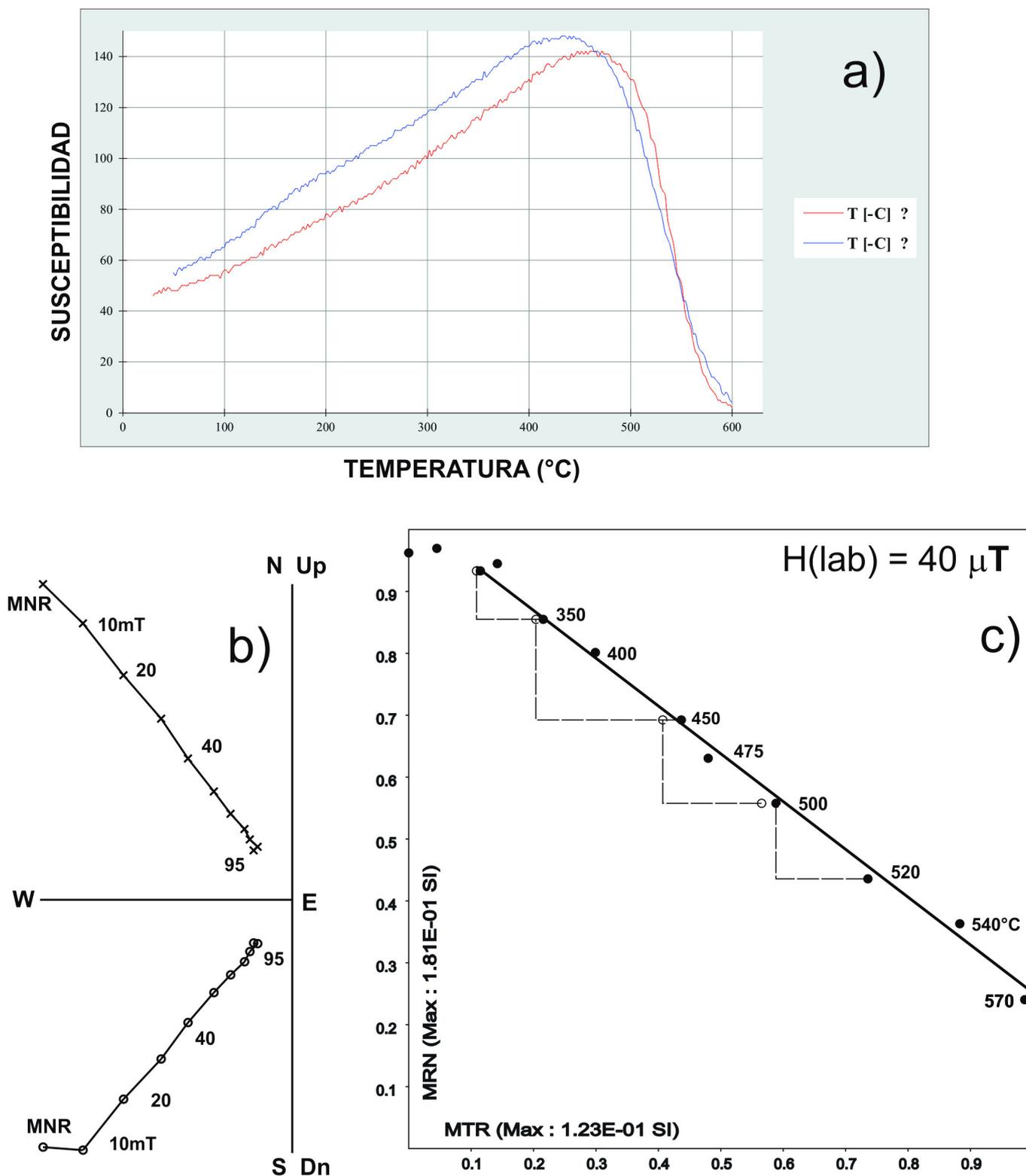


Figura 3. Experimentos magnéticos realizados: a) medición de la susceptibilidad en función de la temperatura, b) desmagnetización de las muestras mediante campos alternos, c) ejemplo del diagrama Arai-Nagata (ver texto para mayores detalles).

escala tales características es Alta Gracia». Muchos otros estudiosos se han referido a Alta Gracia (fig. 1), sobre todo Mario J. Buschiazzo, que la considera como «el más barroco y movido de los edificios de las estancias cordobesas». Después de la expulsión de los jesuitas, la

administración del lugar recae en las Juntas Provinciales y Municipales de Temporalidades. Este organismo tenía como obligaciones más importantes las de fiscalizar las administraciones y organizar las ventas de los bienes con el beneplácito de la Junta Provincial. Sin

embargo, la mayor decadencia del sitio es atribuible a la poca eficiencia y corrupción de la misma (Page 2000).

## ANÁLISIS MAGNÉTICO

Previo a los experimentos de arqueointensidad, se determinó la naturaleza de portadores magnéticos a través del registro de la susceptibilidad en función de la temperatura hasta 600 °C, usando el puente de susceptibilidad *Bartington MS3* equipado con un horno. Todos los experimentos se realizaron sobre los 9 especímenes extraídos de la baldosa de la iglesia (fig. 2). Estos experimentos muestran que la fase dominante ferrimagnética es aquella que corresponde a una titanomagnetita muy pobre en titanio, debido a que las temperaturas de Curie oscilan entre 560 y 575 °C (fig. 3a). También es probable la presencia de hematita o titanohematita en su defecto. Sin embargo, su contribución en la magnetización remanente es menor. Las curvas de calentamiento y enfriamiento son razonablemente reversibles, lo cual indica una estabilidad térmica aceptable en miras de los experimentos de doble calentamiento tipo Thellier (Thellier y Thellier 1959).

Para analizar la estabilidad de la magnetización remanente natural, se realizaron desmagnetizaciones por campos alternos hasta un campo máximo de 95 mT (fig. 3b). Aunque se observa una pequeña componente viscosa menor en las primeras etapas de tratamiento, el resto de la magnetización es esencialmente lineal y apunta al origen. Se puede afirmar entonces que la magnetización adquirida es primaria o característica. Con respecto a las determinaciones de arqueointensidad (fig. 3c), los 8 especímenes analizados fueron exitosos mostrando un comportamiento casi ideal con un segmento lineal considerable, que abarca más de la mitad de la magnetización inicial, y chequeos de la termorremanencia parcial positivos.

Tratándose de material desplazado, tal es el caso del ladrillo o baldosa, es imposible obtener los tres elementos del campo magnético terrestre al momento de elaboración del objeto. Sin embargo, la forma de la baldosa y su espesor son factores que indican la posición horizontal durante la quema. Bajo esta premisa es factible obtener el valor de inclinación magnética dejando indeterminada la declinación. Por tales razones, se procedió a la datación magnética usando solo dos elementos: la inclinación y la intensidad absoluta geomagnética (fig. 4). Con la finalidad de realizar una datación absoluta, recurrimos al modelo geomagnético

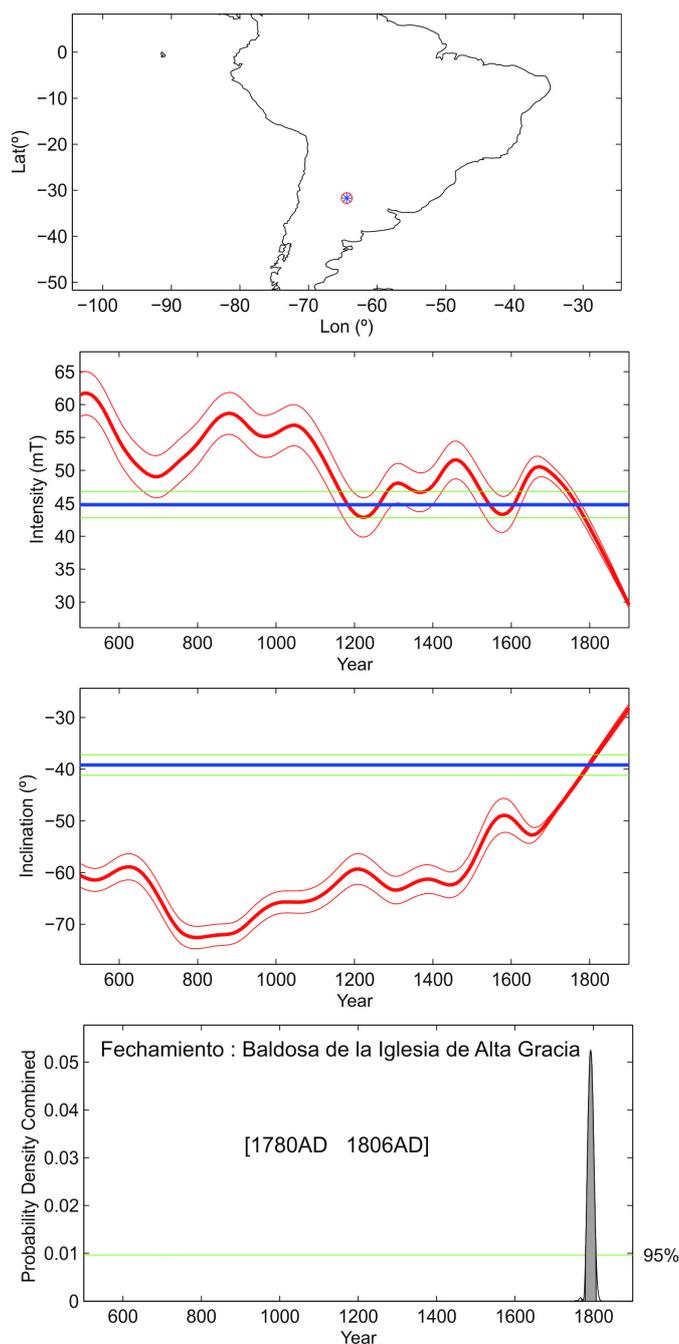


Figura 4. Datación arqueomagnética mediante el modelo SHA.DIF.14k empleando el programa *MATLAB archaeological dating* (Pavón-Carrasco *et al.* 2014).

SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco *et al.* 2014), considerado el de mayor resolución en la variación del campo geomagnético en los últimos 14.000 años. Este análisis apunta a un único intervalo probable entre 1780 y 1806 como la fecha de la elaboración de la baldosa; periodo en el cual se producen varias transferencias del inmueble desde que la Junta de Temporalidades la remata en 1772 a José Rodríguez (1708-1786), conspicuo funcionario de la Corona con inclinaciones a la construcción, que habitó la estancia pero nunca la pagó.

Luego de su muerte, sus hijos Victorino y Manuel solicitaron una moratoria para cumplir con la deuda, pero el monto era tan grande que les convenía que fuera rematada y adquirirla nuevamente por ellos mismos y a menor precio. Entre tanto, se designó a Manuel como administrador de la estancia por unos ocho años hasta que, al no poder cumplir con el pago, el gobernador Sobremonte decidió venderla. Pero he aquí que en 1789, durante el mandato del gobernador-intendente marqués de Sobremonte, se reglamentaron las medidas que debían tener los ladrillos, tejas, tejuelas y baldosas. Estas últimas pasarán a tener una longitud mucho mayor que las aquí datadas (Tissera 2012).

La estancia fue adquirida en 1796 por Juan del Signo, testaferro de Antonio de Arredondo, y el mencionado Victorino Rodríguez que se quedó con el edificio, siendo el primer catedrático de derecho en la Universidad, fusilado en 1810 con el virrey Liniers. La operación no pasó desapercibida y fue denunciada por algunos vecinos aunque sin consecuencias, y Victorino primero alquiló la estancia y luego la vendió a Liniers en 1809 (Page 2000).

## A MODO DE CONCLUSIÓN

Esta investigación demuestra que la baldosa de la iglesia de Alta Gracia es apta para estudios arqueomagnéticos de alta resolución. Su mineralogía magnética es dominada por una fase ferrimagnética que puede considerarse «casi magnetita» debido a sus temperaturas de Curie cercanas a 575 °C. La magnetización portata por estos minerales es altamente estable, tal como atestiguan los experimentos de desmagnetizaciones por campos alternos y análisis de la arqueointensidad geomagnética absoluta, determinada por el método de Thellier (1959) modificado por Coe (1978).

La edad obtenida por medio de la datación arqueomagnética, usando el modelo global de predicción de campo geomagnético SHA.DIF.14k, corresponde a los años entre 1780 y 1806, es decir, la etapa de la administración de los Rodríguez (1772-1809), aunque nos inclinamos hacia antes de la reglamentación de Sobremonte de 1789. De tal manera, es improbable que los jesuitas hayan puesto el solado de ladrillos en una iglesia inconclusa de la cual sabemos fehacientemente que no se había terminado el revoque exterior ni su tejado. También es muy poco probable que la colocación de estas baldosas en particular ocurriera durante el arribo de Santiago de Liniers.

## Agradecimientos

A. Goguitchaichvili agradece el apoyo financiero del proyecto CONACYT n.º 252149 y de UNAM-PA-PIIT IN101717. C. Gogorza agradece al Ministerio de Educación de la República Argentina-Secretaría de Políticas Universitarias, Programa REDES VI.

## REFERENCIAS

- AITKEN, M. J. 1990. *Science-Based Dating in Archaeology*. Londres: Longman. 274 pp.
- BOWLES, J., J. GEE, H. J. HILDEBRAND, L. TAUXE. 2002. Archaeomagnetic intensity results from California and Ecuador: evaluation of regional data. *Earth and Planetary Science Letters* 203/3-4: 967-981.
- COE, R. S. 1978. Paleointensities of the Earth's magnetic field determined from tertiary and quaternary rocks. *Journal of Geophysical Research* 72/12: 3247-3262.
- COLMAN, S. M., K. L. PIERCE, P. W. BIRKELAND. 1987. Suggested terminology for Quaternary dating methods. *Quaternary Research* 28/2: 314-319.
- GENEVEY, A., Y. GALLET, C. G. CONSTABLE, M. KORTE, G. HULOT. 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* 9/4. DOI: 10.1029/2007GC001881.
- GOGORZA, C. S. G., A. M. SINIATO, C. OHLENDORF, S. KASTNER, B. ZOLITSCHKA. 2011. Paleosecular variation and paleointensity records for the last millennium from southern South America (Laguna Potrok Aike, Santa Cruz, Argentina). *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 184/1-2: 41-50.
- GOGUITCHAICHVILI, A., C. GRECO, J. MORALES. 2011. Geomagnetic field intensity behavior in South America between 400 DC and 1800 DC: First archeointensity results from Argentina. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 186/3-4: 191-197.
- GOGUITCHAICHVILI, A., D. LOPONTE, J. MORALES, A. ACOSTA. 2012. The archaeointensity of the Earth's magnetic field retrieved from Pampean ceramics (South America). *Archaeometry* 54/2: 388-400.
- HARTMANN, G., A. GENEVEY, Y. GALLET, R. TRINDADE, C. ETCHEVARNE, M. LE GOFF, M. C. AFONSO. 2010. Archeointensity in Northeast Brazil over the past five centuries. *Earth and Planetary Science Letters* 296/3-4: 340-352.

- KORTE, M., F. DONADINI, C. G. CONSTABLE. 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka: 2. A new series of time-varying global models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10/6. DOI: 10.1029/2008GC002297.
- LINFORD, P. 2006. *Archaeomagnetic Dating. Guidelines on producing and interpreting archaeomagnetic dates*. Swindon: English Heritage.
- PAGE, C. A. 2000. *La estancia jesuítica de Alta Gracia*. Argentina: Universidad Nacional y Católica de Córdoba.
- PAVÓN-CARRASCO, F. J., M. L. OSETE, J. M. TORTA, A. DE SANTIS. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters* 388: 98-109.
- SHAW, J., D. WALTON, S. YANG, T. C. ROLPH, J. A. SHARE. 1996. Microwave archaeointensities from Peruvian ceramics. *Geophysical Journal International* 124/1: 241-244.
- THELLIER, E., O. THELLIER. 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annales de Geophysique* 15: 285-376.
- TISSERA, S. 2012. *Nota a la Comisión Nacional de Monumentos, Museos y Lugares Históricos del 6 de enero de 2012* (copia en nuestro poder).
- VÁZQUEZ, C. A., H. G. NAMI, A. E. RAPALINI. 2001. Magnetic Sourcing of Obsidians in Southern South America: Some Successes and Doubts. *Journal of Archaeological Science* 28/6: 613-618.

RESEARCH ADVANCE

## INTERVENCIÓN ARQUEOMAGNÉTICA DEL HORNO DE LA HACIENDA SAN PEDRO CHOLUL (MÉRIDA, YUCATÁN)

### *Archaeomagnetic Dating of a Kiln from the San Pedro Cholul Hacienda (Merida, Yucatan)*

**Héctor Hernández Álvarez,<sup>1</sup> Soledad Ortiz Ruiz,<sup>2</sup>  
Avto Goguitchaichvili,<sup>3</sup> Juan Morales,<sup>3</sup> Miguel Cervantes-Solano<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Antropológicas, Universidad Autónoma de Yucatán, México; <sup>2</sup> Posgrado de Estudios Mesoamericanos, Universidad Nacional Autónoma de México; <sup>3</sup> Servicio Arqueomagnético Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México

**RESUMEN.** En el presente trabajo se reportan los resultados de un estudio arqueomagnético realizado en un horno para la quema de cal encontrado en la hacienda henequenera de San Pedro Cholul, localizada al noroeste de la ciudad de Mérida en el estado de Yucatán, México. La finalidad del estudio es establecer una cronología confiable y analizar las posibles consecuencias sociales, económicas y ambientales de este asentamiento, el cual existió posiblemente desde mediados del siglo XIX hasta los años sesenta del siglo pasado. Para la determinación de la cronología, se utilizó el método de datación arqueomagnética a estructuras pirotecnológicas de estas características. Las muestras estudiadas provienen de rocas y ladrillos del horno y arrojan una edad entre 1835 y 1896, la cual concuerda con la información histórica disponible y se interpreta como el periodo de producción más importante de la región.

**PALABRAS CLAVE:** Yucatán, Mérida, horno de cal, arqueomagnetismo.

**ABSTRACT.** This paper presents the results of an archaeomagnetic study carried out on a lime burning kiln at the henequen hacienda of San Pedro Cholul (northwest of the city of Merida in the state of Yucatan, Mexico). The purpose of the study is to establish a reliable chronology and to estimate the possible social, economic and environmental implications of this settlement, which may have existed from the middle of the nineteenth century until the 1960s. Archaeomagnetic dating was carried out on samples obtained from rocks and bricks from the kiln and give an



Figura 1. Vista general del horno de quema de cal ubicado en San Pedro Cholul y detalles del muestreo.

age between 1835 and 1896. This date range agrees with available historical information and is interpreted as the most important production period of the region.

Recibido: 28-9-2017. Aceptado: 2-10-2017. Publicado: 9-10-2017.

**KEYWORDS:** *Yucatan, Merida, Lime kiln, Archaeomagnetism.*

## INTRODUCCIÓN

La datación arqueomagnética está basada en el hecho de que el material de los artefactos arqueológicos de barro horneado contiene pequeñas cantidades de minerales magnéticos que, bajo ciertas condiciones, pueden registrar la dirección y la intensidad del campo magnético de la Tierra en el pasado. Cuando se dispone de una curva de referencia de variación secular (VS) bien establecida para un área geográfica determinada, el registro arqueomagnético que se obtiene de los artefactos arqueológicos de barro puede compararse con las curvas VS y proporcionar así una datación precisa del último calentamiento del material estudiado. La precisión de la fecha arqueomagnética dependerá directamente de la disponibilidad y precisión de la curva de VS de referencia para un territorio determinado.

La datación de material arqueológico es un tema clave en la investigación arqueológica ya que puede contribuir significativamente a su mejor entendimiento y al rescate de nuestro pasado y herencia cultural. En la actualidad se ha vuelto muy significativo el obtener tanta información del pasado como sea posible, incluyendo dataciones precisas de los sitios arqueológicos. Esto es debido a la rápida expansión de las ciudades y el desarrollo de nuevas construcciones, que inevitablemente inciden en la destrucción de estructuras arqueológicas en áreas urbanas, ocasionando la pérdida de un conocimiento muy importante sobre nuestro pasado. En el caso de excavaciones de rescate, la datación arqueomagnética puede ser una herramienta valiosa para fechar artefactos hechos de barro horneado, en particular cuando los hallazgos arqueológicos no incluyen alguna estimación de la edad o no hay material útil para emplear otras técnicas. En el caso del salvamento arqueológico, el paleomagnetismo puede resultar de gran utilidad para obtener dataciones precisas que alienten la conservación de los bienes culturales y otorguen un valor agregado a las interpretaciones de los sitios intervenidos.

En este sentido, la presente investigación se enmarca dentro de un proyecto arqueológico cuyo objetivo principal es salvaguardar la mayor cantidad de información acerca de un asentamiento hacendero producto de la llamada Edad de Oro de Yucatán (1875-1925). El asentamiento referido es la hacienda San Pedro Cholul, un

sitio de producción henequenera emplazado en la región noreste de la ciudad de Mérida, cuya época de auge se dio hacia la segunda mitad del siglo XIX y que fue ocupado ininterrumpidamente hasta la década de 1960 (Hernández Álvarez y Zimmermann 2016).

La investigación arqueomagnética en San Pedro Cholul tuvo como objetivo determinar la cronología del uso de un horno para producción de cal que formaba parte de las múltiples instalaciones de producción de esta hacienda henequenera yucateca. Los vestigios arquitectónicos, espaciales y materiales de esta hacienda se encuentran actualmente abandonados y en proceso de quedar integrados dentro de un moderno complejo habitacional. Por esta razón, desde el año 2009, la zona que sería afectada por el nuevo desarrollo urbano fue sometida a un proceso de investigación arqueológica intensiva que tuvo como principal objetivo indagar sobre la vida cotidiana de los operarios que allí trabajaron desde finales del siglo XIX (Hernández Álvarez *et al.* 2012; Hernández Álvarez 2014b; Hernández Álvarez y Zimmermann 2016). Sin embargo, en el año 2015 el enfoque del proyecto se centró en los procesos de industrialización y las consecuencias socioambientales de la explotación henequenera durante la época dorada. El propósito de este proyecto fue entonces investigar los diversos procesos de industrialización de la hacienda San Pedro Cholul y sus referentes materiales, entre ellos la producción de cal, para conocer las consecuencias tanto socioeconómicas como medioambientales del desarrollo de esta empresa henequenera en la región noreste de Mérida hacia finales del siglo XIX y principios del XX (Hernández Álvarez 2015).

## EL HORNO DE LA HACIENDA SAN PEDRO CHOLUL

A partir de las múltiples investigaciones efectuadas desde 2009, nos percatamos de que los principales edificios del casco de la hacienda (casa principal, casa de máquinas, capilla, bodega y administración) fueron construidos principalmente con roca caliza de la región y un mortero de cal que presenta muchas impurezas (restos de carbón vegetal principalmente). Igualmente, el enlucido de cal que se usó tanto para los muros de los edificios como para los pisos de las habitaciones parecía de manufactura propia. Además, la presencia de diversos bancos de material (*sascaberas*) en el interior del asentamiento y de una estructura, cuyas características son las de un horno probablemente para pro-

ducción de cal, nos sugerían que hacia la segunda mitad del siglo XIX, dentro de la hacienda ya se estaban llevando a cabo distintos procesos para la obtención de materiales constructivos.

El supuesto horno de la hacienda San Pedro Cholul se encuentra dentro de un terreno que se ubica en el costado suroeste de los principales edificios (casco), a unos 70 m de la casa principal. La estructura que sirvió probablemente como horno en dicha hacienda es una construcción de mampostería de piedra caliza, de poco más de 5 m de alto (fig. 1a), con un recubrimiento enlucido de cal. El horno es de tipo cilíndrico en el interior, con apertura en la parte superior, mientras que en el exterior su base es cuadrangular y su cuerpo de forma octagonal. Presenta dos escalinatas, con diez escalones cada una, localizadas en el este y el oeste, para acceder a la parte superior de la estructura. En su base, al norte, se observa otra apertura o boca, que permite introducirse en el interior por la parte baja. La presencia de dicho acceso, correspondiente a una cámara de

combustión, nos sugirió en un primer momento que pudiera tratarse de un horno, aunque no sabíamos exactamente qué es lo que se estaba horneando en su interior.

Algunos habitantes descendientes de San Pedro, que actualmente residen en el pueblo de Cholul y trabajaron en los últimos momentos de ocupación de la hacienda en el siglo XX (Hernández Álvarez y Martín Medina 2016), nos señalaron que no tenían idea de qué se estuvo produciendo allí. Hubo quienes incluso mencionaron que se pudo haber tratado de un horno para cocer pan, mientras que otros señalaron que pudo servir para elaborar carbón o cal. Cabe destacar que las paredes internas del horno están recubiertas con ladrillos refractarios (de diferentes marcas y procedencia) y roca sedimentaria.

Hacia finales de septiembre de 2016, la estructura fue intervenida por los expertos del Servicio Arqueomagnético Nacional (SAN) de la UNAM, quienes acudieron a San Pedro Cholul para extraer muestras del horno con la finalidad de realizar dataciones por arqueomagnetismo (fig. 1b). Esta técnica nos puede permitir conocer cuándo fue la última vez que una estructura fue expuesta al fuego. Para lograr tal objetivo, se hicieron perforaciones en algunas rocas y ladrillos refractarios del interior del horno a fin de extraer las muestras y determinar sus orientaciones magnéticas *in situ* (fig. 1c).

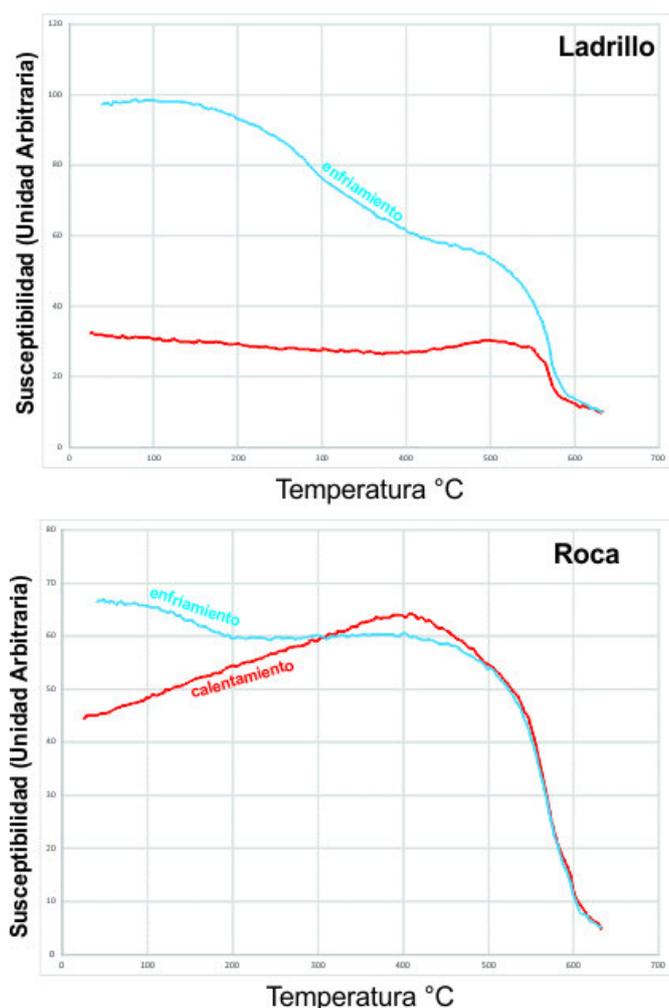


Figura 2. Registro de la susceptibilidad magnética en función de la temperatura para estimar la temperatura de Curie de los minerales portadores de la magnetización remanente.

## EXPERIMENTOS ARQUEOMAGNÉTICOS

Con la finalidad de determinar la naturaleza y la estabilidad térmica de los minerales responsables de la magnetización, se procedió a registrar las curvas de susceptibilidad vs. temperatura hasta 630 °C (fig. 2) mediante un puente de susceptibilidad MFK1A de AGICO. En el caso particular de las muestras de ladrillos, se observa una marcada inestabilidad térmica debido a la total irreversibilidad de las curvas de calentamiento y enfriamiento. Detectamos dos fases ferrimagnéticas durante el calentamiento (titanomagnetita pobre en titanio y posible presencia de maghemita) mientras la curva de enfriamiento solo evidencia la fase cercana a la magnetita pura. Mientras tanto, las muestras de rocas muestran mayor estabilidad y la evidencia de una sola fase magnética en ambos segmentos. Las curvas son razonablemente reversibles entre 400 y 600 °C.

Se realizaron los tratamientos magnéticos mediante las desmagnetizaciones por campos alternos para defi-

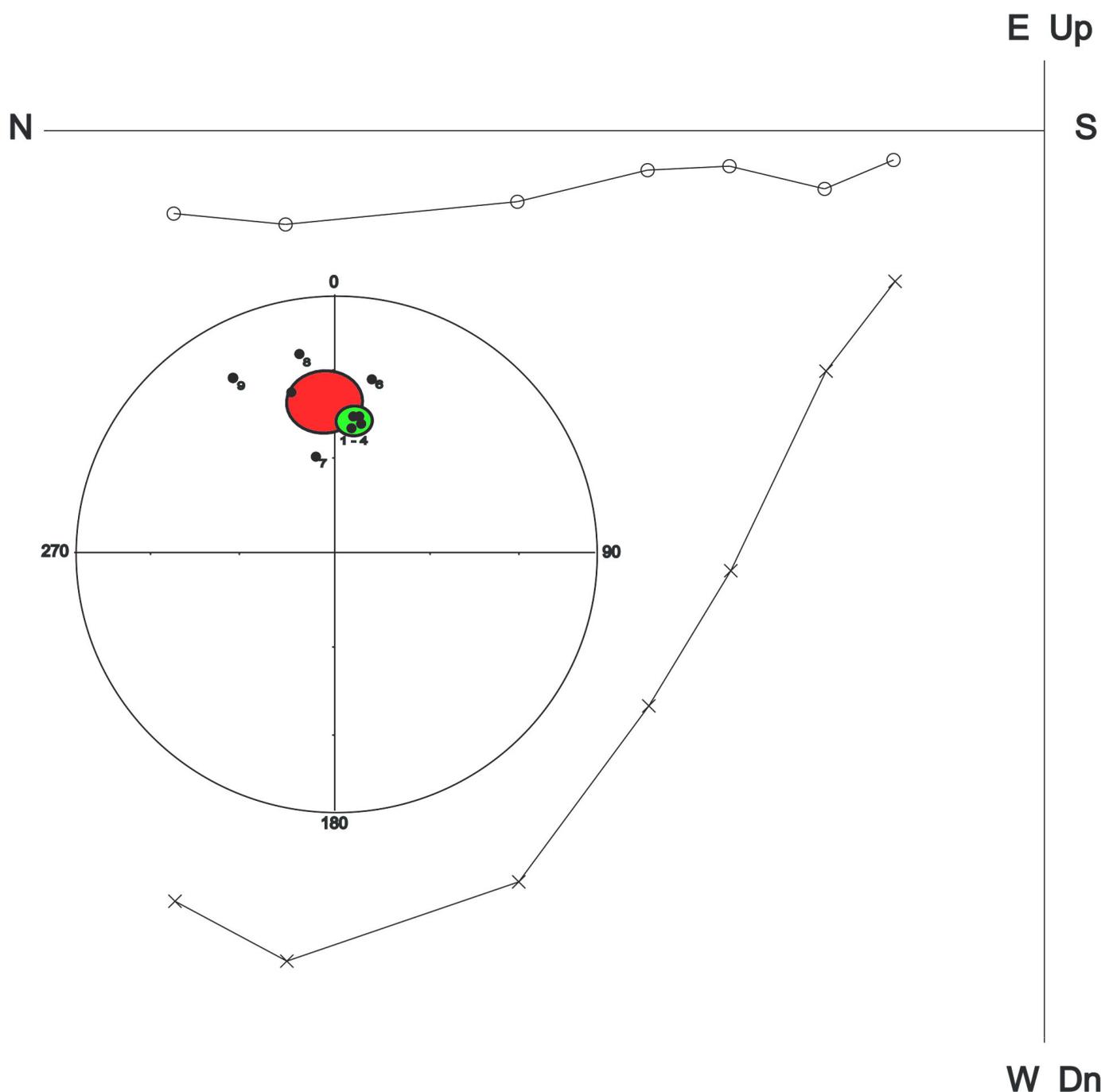


Figura 3. Diagrama de iguales áreas para proyectar las direcciones características (declinación e inclinación) por muestra (ver texto para mayores detalles) junto con la curva ortogonal de desmagnetización por campos alternos hasta 90  $\mu\text{T}$ .

nir las direcciones (declinación e inclinación) arqueomagnéticas mediante un desmagnetizador *LDA3* hasta 85  $\mu\text{T}$ , mientras que las remanencias magnéticas fueron medidas usando un magnetómetro *JR6A*. Aquí también las muestras de roca mostraron mejor comportamiento y agrupamiento satisfactorio en el diagrama de iguales áreas (círculo de confianza al 95 % en color verde en la fig. 3). Las direcciones arqueomagnéticas obtenidas de las muestras de ladrillos muestran una marcada dispersión (círculo de confianza en color rojo) y alejamiento importante de las direcciones medias de

las rocas. Este comportamiento está ligado a la inestabilidad térmica mostrada en los experimentos de la susceptibilidad en función de la temperatura.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Debido a un comportamiento no idóneo, observado en los experimentos de la mineralogía magnética, no es factible determinar la intensidad geomagnética absoluta mediante el método de Thellier (1959) de

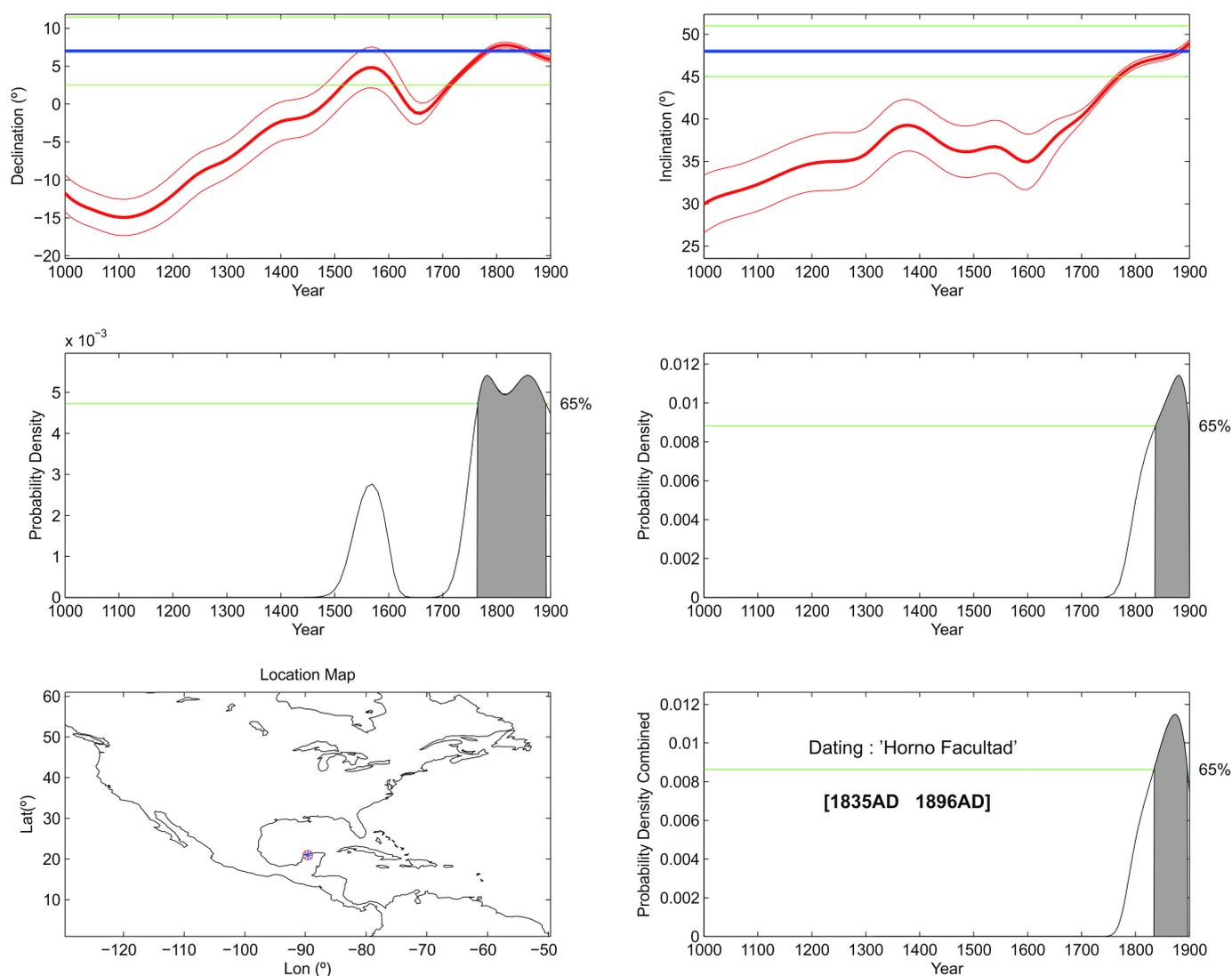


Figura 4. Datación arqueomagnética basada en las direcciones (declinación e inclinación) características de 4 muestras (en rojo en la fig. 3) mediante el modelo SHA.DIF.14K empleando el programa *MATLAB archaeo\_dating* (Pavón-Carrasco *et al.* 2014).

doble calentamiento. Por lo tanto, se efectuó el ejercicio de datación magnética usando dos elementos: la inclinación y la declinación magnética (fig. 4). Con la finalidad de realizar una datación absoluta (fig. 4), recurrimos al modelo geomagnético SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco *et al.* 2014), considerado el de mayor resolución en la variación del campo geomagnético en los últimos 3000 años para la región mesoamericana. Usando las arqueodirecciones (Inc =  $7.06^\circ$ ; Dec =  $47.89^\circ$ ) con los parámetros de confianza de la estadística de Fisher  $\kappa = 1332$  y  $\alpha_{95} = 2.5^\circ$ ) determinadas para las 4 muestras, se obtuvo un único intervalo probable entre 1835 y 1896 como la fecha de funcionamiento del horno de la hacienda San Pedro Cholul.

La datación por arqueomagnetismo del horno de la hacienda San Pedro Cholul tiene una marcada importancia en la región, al ser la primera de su tipo para estructuras pirotecnológicas de tales características. La idea

de obtener fechas absolutas sobre el momento en el cual se realizaron quemas en el horno de San Pedro era obtener certeza acerca de cuándo la hacienda diversificó su producción, desarrolló su infraestructura e intensificó la labor de sus trabajadores.

El intervalo obtenido por datación arqueomagnética, que va de 1835 a 1896, es coherente con la información histórica referente a la época de auge de la hacienda San Pedro Cholul; igualmente lo es con respecto al momento de desarrollo de la industria henequenera en la península de Yucatán. Hacia 1834, la invención de la engavilladora de trigo *McCormick* en los Estados Unidos demandó grandes cantidades de hilo de *sosquil* peninsular. Esto detonó la industria de explotación de henequén a partir de la adopción de nuevas tecnologías para la producción como la máquina raspadora, así como la adopción de los ferrocarriles y la creación de un moderno puerto para la exportación de la fibra (Bar-

celó Quintal 2011; Hernández Álvarez 2014a; Wells 1985). Además, el crecimiento de la infraestructura de las haciendas henequeneras fue un evento sin precedentes (Paredes Guerrero 2006). Por lo tanto, dichas transformaciones requirieron gran cantidad de material constructivo que, al parecer, fue provisto por las mismas fincas rurales.

La historia de la finca San Pedro nos señala que esta se transformó de una modesta estancia ganadera a una hacienda henequenera hacia 1875, cuando su nuevo dueño, Juan José Herrera, decidió invertir en la construcción de una serie de instalaciones tendientes a explotar comercialmente el henequén (Medina Suárez y Cámara Gutiérrez 2016). A él se debe la construcción de la casa de máquinas, la casa de la prensa, la capilla, además de la inversión en maquinaria para raspar el henequén y un moderno sistema *Decauville* para transportar las hojas de dicha planta, el producto terminado, disponer los desechos y conducir a los trabajadores del campo a la finca.

Es muy probable que a esta época corresponda el horno de cal de la hacienda. La necesidad cada vez mayor de material de construcción, piedra, *sascab* y cal para los edificios de la hacienda, así como para construir nuevas viviendas que albergaran a la creciente población de trabajadores, incentivó el establecimiento de dicha instalación para obtener cal a partir de los recursos naturales disponibles en los alrededores de la finca: piedra para quemar y leña de los montes cercanos. Sin embargo, en el avalúo realizado a la hacienda San Pedro hacia 1898, debido a la muerte de su propietario, el horno no figura como una de las estructuras descritas. Si ahora sabemos, a partir de la datación arqueomagnética, que la fecha final del horno fue 1896, es muy probable que dicha instalación ya se encontrara abandonada para la época en la que se realizó dicho registro. Otro dato interesante es que, cuando entrevistamos a un grupo de los últimos pobladores de la hacienda para recuperar su memoria histórica (Hernández Álvarez y Medina Martín 2016), que vivieron hacia las décadas de 1950-1960, estos manifestaron no saber para qué se utilizó dicha estructura y dijeron que nunca vieron dicho horno en funcionamiento.

La obtención de fechas arqueomagnéticas de la estructura que sirvió para quemar cal de una hacienda henequenera ha resultado útil para los objetivos del proyecto que pretende documentar los procesos de explotación agroindustrial y los cambios socioeconómicos y ambientales sucedidos durante la llamada Edad de Oro de Yucatán. La datación nos sirve para corroborar las

etapas de intensificación de la producción tanto de cal como de fibra de henequén y la época de mayor auge constructivo de la hacienda. Además, cabe señalar que al tratarse este del primer estudio sobre datación arqueomagnética en contexto histórico en la península de Yucatán, nos ofrecerá la posibilidad de comparar los resultados con otros sitios similares a nivel local, nacional e internacional.

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto CONACyT Ciencia Básica n.º 258270. AG agradece apoyo parcial de proyecto CONACyT n.º 252149.

### REFERENCIAS CITADAS

- BARCELÓ QUINTAL, R. 2011. Los ferrocarriles en Yucatán y el henequén en el siglo XIX. *Mirada Ferroviaria* 15: 5-16.
- HERNÁNDEZ ÁLVAREZ, H.
- 2014a. Un ruidoso litigio en materia de máquinas: el cambio tecnológico en la explotación del henequén, siglos XIX y XX. En *Estética y poder en la ciencia y la tecnología: acercamientos multidisciplinarios*, editado por S. Ayora Díaz y G. Vargas Cetina, pp. 85-106. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán.
  - 2014b. Corrales, chozas y solares: estructura de sitio residencial de la hacienda San Pedro Cholul, Yucatán. *Temas Antropológicos* 36/2: 129-152.
  - 2015. *Proyecto San Pedro Cholul: geoarqueología, historia e industrialización de una hacienda henequenera yucateca de principios del siglo XX*. México, D. F.: Consejo Nacional para la Ciencia y la Tecnología. Manuscrito en posesión del autor.
- HERNÁNDEZ ÁLVAREZ, H., G. MARTÍN MEDINA. 2016. Arqueología colaborativa y recuperación de la memoria histórica: hacienda San Pedro Cholul, Yucatán. *Temas Antropológicos* 38/2: 109-127.
- HERNÁNDEZ ÁLVAREZ, H., G. MARTÍN MEDINA, A. CU PÉREZ. 2012. La arqueología histórica y el estudio de las haciendas henequeneras de la región noreste de Mérida. En *Estrategias en arqueología: memorias del III Simposio de Arqueología de la UAEMex*, editado por V. Palma Linares, R. de la Peña Virchez y J. Mejía Carranza, pp. 76-97. México, D. F.: Universidad Autónoma del Estado de México.

- HERNÁNDEZ ÁLVAREZ, H., M. ZIMMERMANN, EDS. 2016. *Sendas del henequén: un estudio arqueológico de la hacienda San Pedro Cholul, Yucatán*. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán.
- PAREDES GUERRERO, B. 2006. *Arquitectura de las haciendas de Yucatán*. Mérida: Fomento Cultural Banamex, Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Yucatán.
- PAVÓN-CARRASCO, F. J., M. L. OSETE, J. M. TORTA, A. DE SANTIS. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters* 388: 98-109.
- THELLIER, E., O. THELLIER. 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annales de Geophysique* 15: 285-376.
- WELLS, A. 1985. *Yucatán's Gilded Age: Haciendas, Henequen, and International Harvester, 1860-1915*. Albuquerque: University of New Mexico Press.

RESEARCH ADVANCE

## TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA 3D EN LA CATEDRAL DE MORELIA, MÉXICO

### *3D Electrical Resistivity Tomography in Morelia Cathedral, Mexico*

*Gerardo Cifuentes-Nava,<sup>1</sup> Roberto Cabrer-Torres,<sup>2</sup>  
Andrés Tejero-Andrade,<sup>3</sup> Esteban Hernández-Quintero,<sup>1</sup>  
Alejandro García-Serrano,<sup>3</sup> René Chávez-Segura,<sup>1</sup>  
Avto Goguitchaichvili,<sup>1</sup> Miguel Cervantes-Solano<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Instituto de Geofísica, UNAM, México; <sup>2</sup> Escuela Nacional de Estudios Superiores-Morelia, UNAM, México; <sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

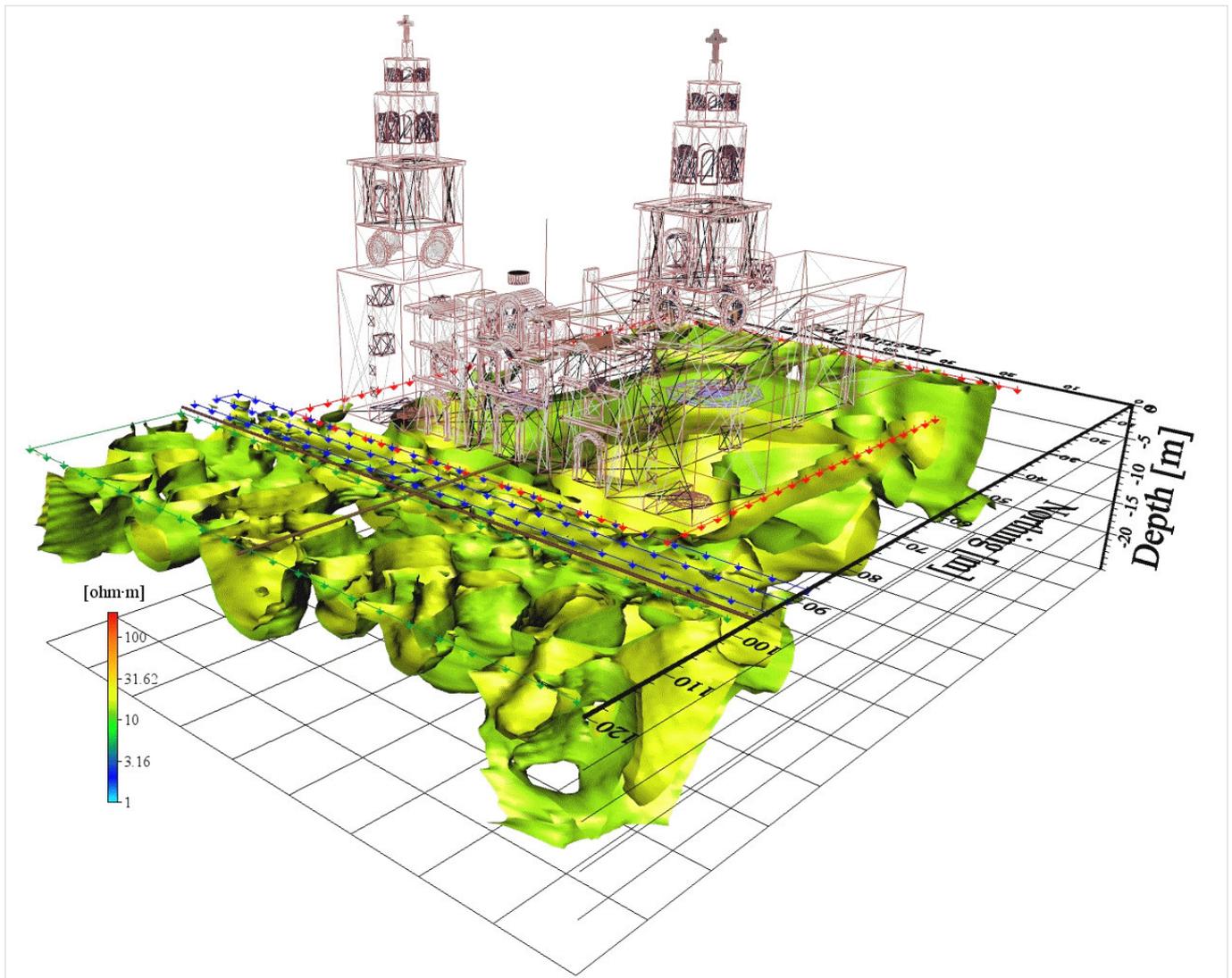


Figura 1. Anomalía en colores falsos mostrando superficies de isoresistividad de la TRE-3D, en una vista NW de la Catedral de Morelia.

*Recibido: 21-10-2017. Aceptado: 26-10-2017. Publicado: 4-11-2017.*

Edited & Published by Pascual Izquierdo-Egea. English proofreading by Emily Lena Jones. Arqueol. Iberoam. Open Access Journal. License CC BY 3.0 ES. <http://purl.org/aia/364>.

**RESUMEN.** *La tradición oral en la ciudad de Morelia, México, así como evidencias parciales en algunos edificios, han llevado a la creencia de la existencia de túneles subterráneos en el centro de esta ciudad, los cuales pertenecerían a la época colonial de nuestro país. Dicho centro fue declarado patrimonio cultural de la humanidad en 1991 por la UNESCO, por lo que es poco factible la excavación o perforación directa destructiva con la intención de explorar. En este contexto, la implementación de técnicas no invasivas es perfecta para localizar zonas de interés, de tal forma que los métodos de exploración geofísica son adecuados, al no ser destructivos y proporcionar una imagen del subsuelo para corroborar la existencia indirecta de estructuras en profundidad. Se presentan los estudios con tomografía de resistividad eléctrica tridimensional (TRE-3D) llevados a cabo en 2014, 2016 y 2017 en la Catedral de Morelia y su frente norte, en donde se pueden ubicar estructuras organizadas no acordes con el entorno geológico del sitio, los cuales pueden suministrar indicios de la existencia de diversas estructuras de origen antrópico. La TRE-3D aplicada para este estudio es una combinación entre metodologías convencionales y no convencionales; ofrece una imagen de la distribución de estructuras en profundidad que muestran características concordantes con tradiciones orales y hechos históricos documentados referentes al desarrollo de la Catedral de Morelia a través del tiempo.*

**PALABRAS CLAVE:** *Catedral de Morelia, exploración geofísica, tomografía de resistividad eléctrica tridimensional, estructuras subterráneas.*

**ABSTRACT.** *Oral traditions, as well as partial evidence in some buildings, have led to a belief in the existence of underground tunnels dating to the colonial period in downtown Morelia, Mexico. The city of Morelia was declared a UNESCO World Heritage Site in 1991, making excavation impossible. Nondestructive geophysical exploration methods, however, can provide an image of the subsoil to test for existence of tunnels or other subterranean structures. This paper reports results from survey using three-dimensional electrical resistivity tomography (TRE-3D) carried out in 2014, 2016 and 2017, in Morelia Cathedral and along its northern front. The survey identified the location of deep structures which cannot be explained by geological context, suggesting the existence of a variety of subterranean structures of anthropogenic origin. The TRE-3D used in this study combines conventional and unconventional methodologies to offer insights into the distribution of subterranean structures at Morelia Cathedral, in accordance with both oral traditions and documented history.*

**KEYWORDS:** *Morelia Cathedral, geophysical exploration, three-dimensional electrical resistivity tomography, subterranean structures.*

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Valladolid (actual Morelia) fue fundada en el año 1541, sin embargo no cobró importancia hasta 1580 con el traslado de poderes eclesiásticos de Pátzcuaro a Valladolid (Ramírez-Romero 1985). La catedral actual comenzó a construirse en 1660 y fue terminada en 1744 con un proyecto original de Vicente Barroso; cabe mencionar que existió un primer proyecto que inició su construcción poco antes de la versión actual y que los cimientos de dicha estructura se encuentran en el sitio pero se desconoce su posición exacta (Ramírez-Montes 1987).

De los personajes y documentos descritos por Ramírez-Montes (1987) no existe ningún indicio de la construcción de túneles o drenajes en el subsuelo del edificio actual. Por otro lado, el desarrollo de los componentes interiores sí está bien documentado, ya que en 1897 se renovó completamente el interior del edifi-

cio y resalta el desplazamiento del altar mayor y el coro de los canónigos del centro hacia el ábside. La cripta original de los obispos se encontraba por debajo del altar mayor original y se construyó una nueva, en el proceso de esta remodelación, por debajo del altar actual.

La exploración geofísica con el objetivo de buscar estructuras en profundidad no es nueva. Asociaciones civiles y entidades gubernamentales, como Morelia Patrimonio de la Humanidad A. C. y el Instituto Nacional de Antropología e Historia, entre otros, han participado y solicitado estudios a particulares y especialistas en el tema, como la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En particular, esta última, a través del Instituto de Geofísica y la Facultad de Ingeniería, ha llevado a cabo estudios de *radar de penetración terrestre* (GPR) y *tomografía de resistividad eléctrica tridimensional* (TRE-3D) en 2006 y 2009. Los resultados han sido bastante alentadores, sobre todo en

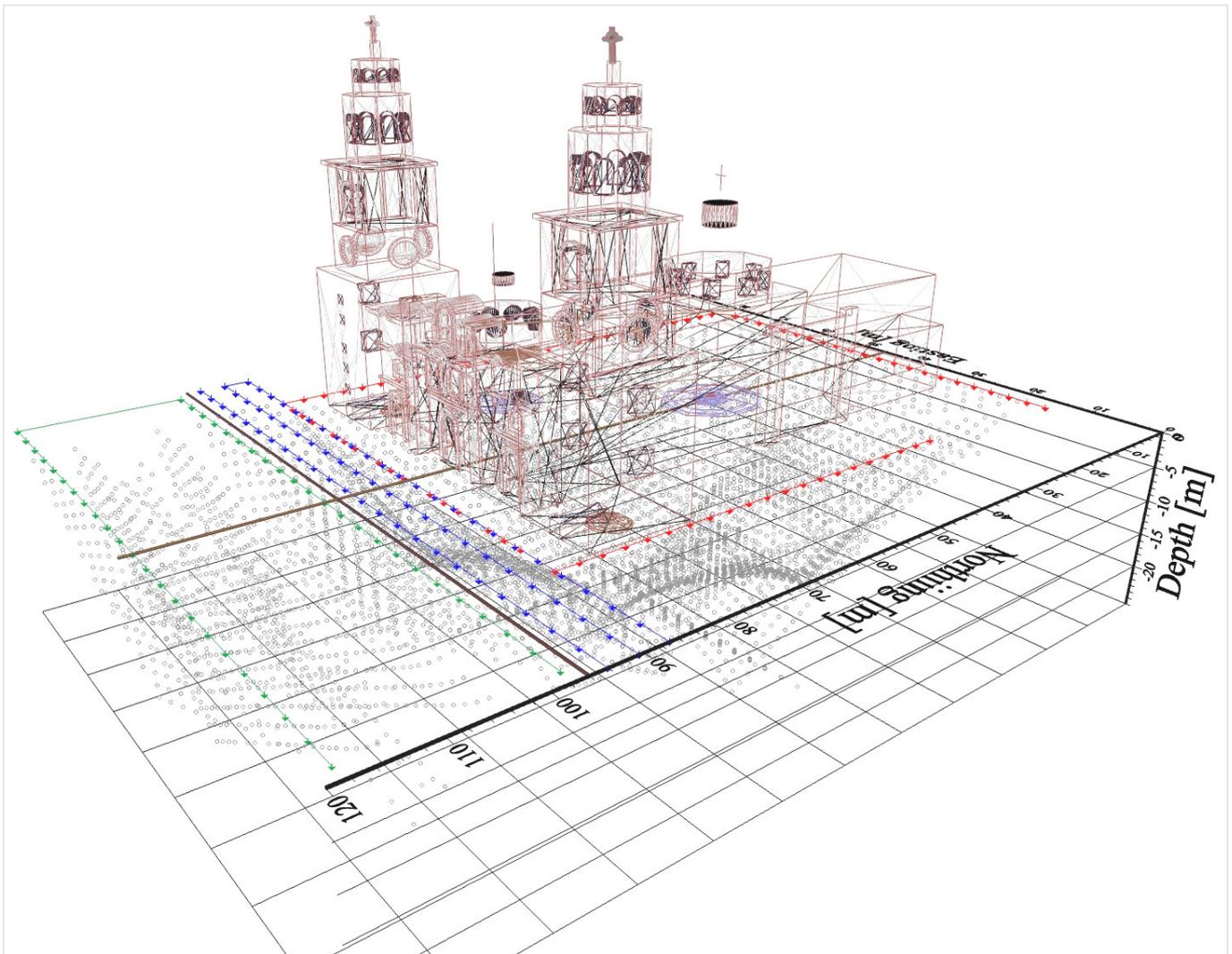


Figura 2. Emplazamiento de los electrodos para los años 2014, 2016 y 2017 (flechas verdes, azules y rojas, respectivamente) y los puntos de atribución de cada medición para la TRE-3D.

2009, donde se localizaron al menos 4 estructuras de interés en cada uno de los costados del edificio de la catedral (Chávez *et al.* 2010). Los estudios TRE-3D que se presentan para los años de 2014, 2016 y 2017 se llevaron a cabo empleando metodologías convencionales de adquisición (2014 y 2016) y no convencionales (2017), este último basado en los arreglos diseñados y analizados por Tejero-Andrade *et al.* (2015).

## METODOLOGÍA

La TRE-3D es una técnica de prospección ampliamente usada para explorar el subsuelo con objetivos muy diversos, como geotécnicos, arqueológicos y de recursos naturales, entre otros (Chávez *et al.* 2015; Argote *et al.* 2013). Este método determina la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo, indicando

la capacidad de los materiales para conducir electricidad, de tal forma que, conociendo el comportamiento del parámetro físico de estos y de estructuras geológicas, se puede hacer una interpretación de la imagen obtenida después de un proceso de adquisición e inversión matemática. La propiedad física dependerá en gran medida no solo de su composición química sino también de su tamaño de grano, porosidad y contenido de humedad (Loke 2010). Es muy importante conocer que los valores de resistividad de cada material tienen un rango, de tal forma que usualmente existe traslape de valores y, como consecuencia, hay interpretaciones ambiguas bajo determinadas circunstancias. La adquisición depende de los arreglos de los electrodos que se empleen, existiendo convencionales, con perfiles paralelos de electrodos instalados en superficies libres de obstáculos (Loke y Barker 1996), o no convencionales, diseñados para cuando se tiene un obstáculo como es

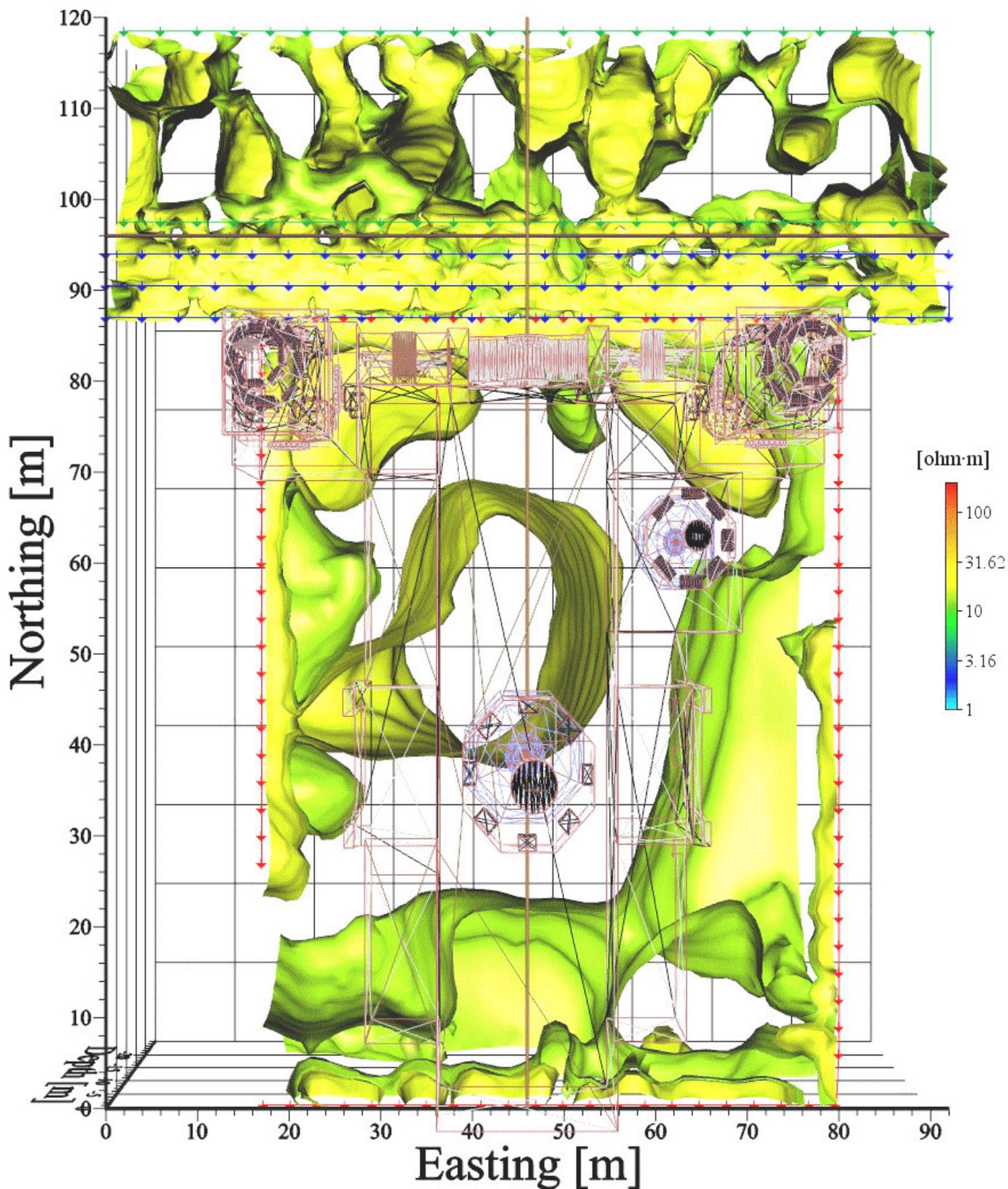


Figura 3. Vista superior de las superficies de isoresistividad de TRE-3D, donde se aprecian las estructuras tubulares del norte en la avenida Madero y el atrio, así como la estructura tubular oeste, la forma de olla central y la cuadrada en el ábside del subsuelo.

el edificio de la Catedral de Morelia (Tejero-Andrade *et al.* 2015). En los estudios realizados en la avenida Madero y el atrio de la Catedral (2014 y 2016) fueron usados arreglos de electrodos convencionales de TRE-

3D, ya que no se presentaban obstáculos que impedirían la instalación de los mismos; en 2017, empleando metodologías no convencionales, se estudió el edificio de la catedral. Las tres etapas se realizaron en la tempo-

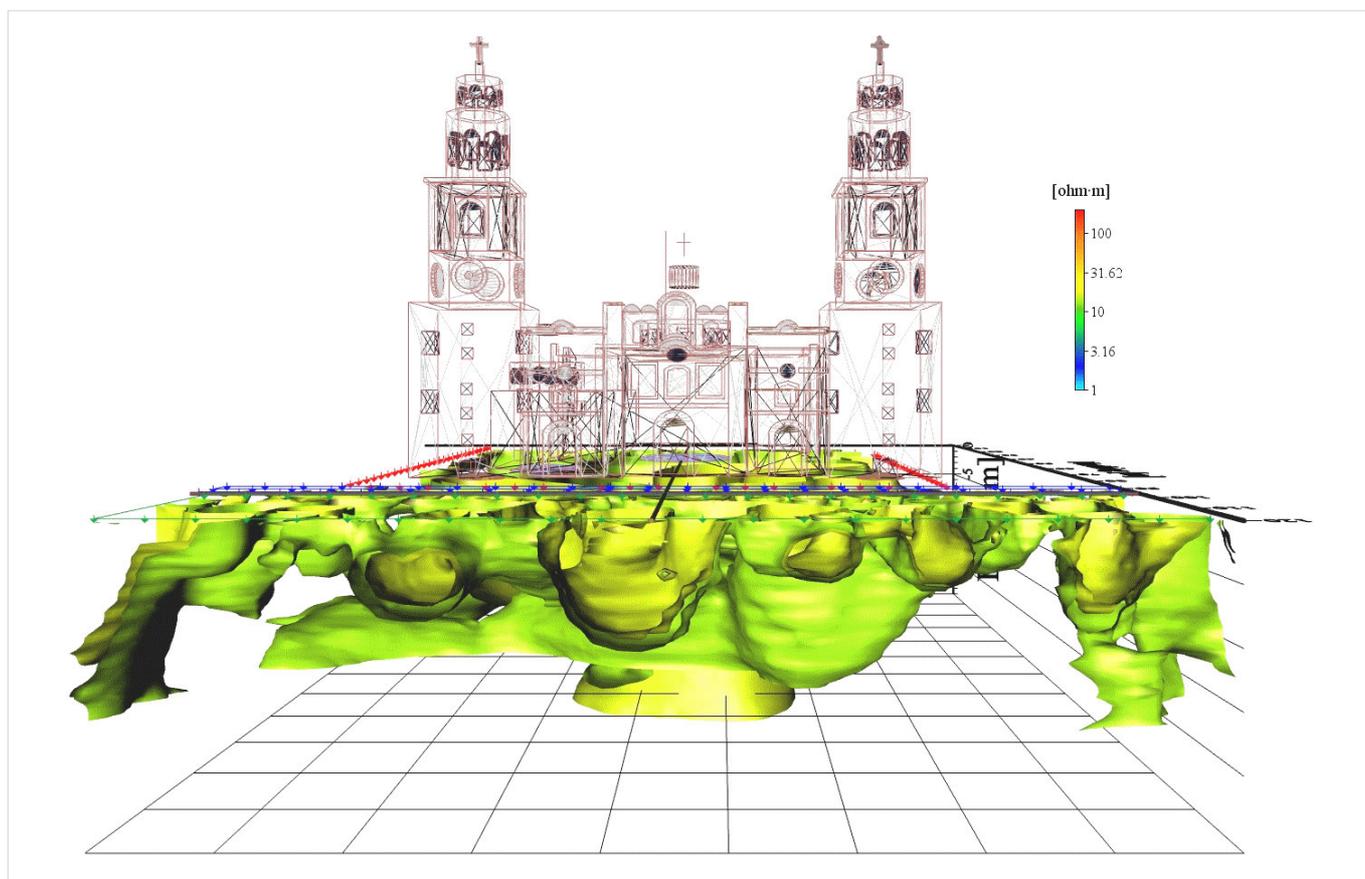


Figura 4. Vista frontal del lado norte, donde las superficies de isorresistividad definen al menos 3 estructuras tubulares con continuidad.

rada de estiaje para la zona de estudio, concretamente en el periodo de diciembre a enero. Los arreglos convencionales empleados fueron Wenner-Schlumberger (WS), ecuatorial (Eq) y mínimo acoplamiento (MA); mientras que los no convencionales fueron los arreglos en L para WS y Centroide desarrollados por Tejero-Andrade *et al.* (2015).

La combinación del uso de todos los arreglos forma un mapeo del subsuelo donde, para cada medición, existe un punto de atribución en profundidad. Para la Catedral de Morelia, la composición de 2014, 2016 y 2017 posee una densidad muy detallada de la información que proporcionará el estudio TRE-3D, teniendo en total 6477 mediciones del subsuelo, cubriendo un volumen en profundidad de 47,797 m<sup>3</sup> (fig. 2). Para los arreglos usados, la separación entre electrodos fue de 4 m para 2014 y 2016, mientras que para 2017 fue de 3 m.

## RESULTADOS

La imagen de TRE-3D obtenida del subsuelo de la Catedral de Morelia, su atrio y la avenida Madero, re-

presentada a través de una escala de colores falsos, muestra un subsuelo complejo, con un valor de fondo de la resistividad cercano a los 20 [ohm·m], representativo de los materiales geológicos de origen volcánico, ignimbritas principalmente (Garduño-Monroy *et al.* 2001), que componen el subsuelo con cierto grado de humedad por lo bajo de su valor de resistividad. Sin embargo, se pueden diferenciar claramente superficies de isorresistividad que determinan estructuras organizadas, elementos que pueden pertenecer a formas tubulares por un lado y, por el otro, a elementos que corresponden a modificaciones realizadas a la catedral a finales del siglo XIX (fig. 1), descritas por Ramírez-Montes (1987).

En la figura 1, perspectiva noroeste de la anomalía TRE-3D de la catedral, se pueden apreciar, en lo que corresponde a la avenida Madero y el atrio, estructuras tubulares con una dirección preferencial norte-sur que se dirigen hacia la catedral; al menos una de estas, en la porción central, se puede conectar con una estructura similar en el subsuelo del edificio, coincidiendo perfectamente con la puerta central de acceso. Otra estructura tubular se puede apreciar muy bien definida en el

costado oeste del edificio, por debajo del acceso respectivo, cuyo centro está a 10 m de profundidad, donde lo más importante es que tiene continuidad con una estructura mayor en forma de olla, que se aprecia mucho mejor en la figura 3 y que aparenta cubrir toda la altura de la anomalía de TRE-3D. Esta estructura se corresponde muy bien con la cripta original de los obispos, desplazada en 1897 al ábside, donde se observa una estructura cuadrangular que coincide con la posición de la cripta actual, donde incluso se denota el acceso a la superficie, al este de la misma, y una posible conexión hacia el sur que no ha sido posible verificar, pero que algunas personas piensan que es una conexión con el templo de San Agustín, localizado a dos calles de la Catedral de Morelia. Asimismo, parece que la estructura que corresponde a la primera cripta de los obispos solo tiene una estructura de entrada y es la que se mencionó en la parte oeste de la misma (fig. 3).

La parte norte de la catedral, particularmente lo que corresponde a la avenida Madero y el atrio (fig. 4), como se mencionó, muestra al menos tres estructuras tubulares muy bien definidas y que, sobre todo, tienen continuidad. De las tres, la única que presenta en la anomalía de TRE-3D una prolongación hacia el subsuelo de la catedral es la central, las otras dos tienen una desviación que las lleva hacia la estructura central, pareciendo que se unen justo antes de llegar al edificio. Las profundidades del centro de las mismas van de los 5 hasta los 10 m.

## DISCUSIÓN

Las anomalías de TRE-3D descritas en los resultados parecen confirmar al menos la existencia de estructuras organizadas que pueden corresponder a túneles por su geometría y continuidad. Se confirma la presencia de al menos 3 estructuras en la porción norte, que parecen unirse y continuar en una sola hacia el subsuelo del edificio, y una cuarta muy bien definida en la parte oeste, comunicada con la estructura en forma de olla. El diámetro de cualquiera de estas estructuras no debe confundirse con las dimensiones reales de lo que se define, por dos motivos: el primero porque la técnica define los contrastes entre materiales en profundidad pero de forma progresiva en todo el rango de valores de resistividad que definen las estructuras; el segundo se debe a la resolución del estudio, la cual tiene que ver con la separación entre los electrodos, que establece la detectabilidad de un objeto y su definición en la ima-

gen final. Por lo tanto, la dimensión real de los objetos seguramente es más pequeña que la imagen que los representa, aunque el valor de la profundidad o localización del centro de la estructura es completamente válido para cualquier cuerpo.

En la estructura en forma de olla y la cuadrada en el ábside del edificio hay que tomar en cuenta un aspecto importante, además de lo que se ha mencionado con respecto a la separación entre electrodos. En ambos casos parecen ser estructuras que abarcan toda la altura de la anomalía. Esto, como lo demostraron Tejero-Andrade *et al.* (2015), es una extrapolación matemática del proceso de inversión debido a la ausencia de puntos de observación por debajo y por encima de la estructura detectada, que es común para los arreglos no convencionales de TRE-3D; sin embargo, la detectabilidad horizontal es muy buena y, por lo tanto, es mejor para localizar estructuras lateralmente.

En el siguiente paso, una vez localizadas estructuras de interés, asociadas no solo a la tradición oral sino además a registros históricos de la construcción y modificaciones de la Catedral de Morelia, debe llevarse a cabo la verificación directa de estas a través de excavaciones arqueológicas, con la certeza en la posición del lugar de búsqueda que nos indicó el resultado de la TRE-3D.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a los alumnos y profesores de Ingeniería Geofísica participantes, de la Facultad de Ingeniería y Licenciatura en Geociencias de la Escuela Nacional de Estudios Superiores-Morelia, ambas de la UNAM, así como a la Asociación Civil Morelia Patrimonio de la Humanidad y la Gerencia del Patrimonio Cultural de la Ciudad de Morelia por su ayuda en el desarrollo de este proyecto. El financiamiento fue aportado con proyectos personales y grupales del Instituto de Geofísica y la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

## Contacto

GERARDO CIFUENTES-NAVA ([gercifue@geofisica.unam.mx](mailto:gercifue@geofisica.unam.mx)).  
AVTO GOGUITCHAICHVILI ([avto.gogichai@gmail.com](mailto:avto.gogichai@gmail.com)).

## REFERENCIAS CITADAS

- ARGOTE-ESPINO, D., A. TEJERO-ANDRADE, G. CIFUENTES-NAVA, L. IRIARTE, S. FARIAS, R. E. CHÁVEZ, F. LÓPEZ. 2013. 3D electrical prospection in the archaeological site of El Pahñú, Hidalgo State, Central Mexico. *Journal of Archaeological Science* 40/2: 1213-1223.<sup>1</sup>
- CHÁVEZ, R. E., A. TEJERO, G. CIFUENTES, E. HERNÁNDEZ. 2010. *Localización de túneles en los alrededores de la Catedral de Morelia mediante el método de tomografía eléctrica*. Instituto de Geofísica, UNAM (inédito).
- CHÁVEZ, R. E., A. TEJERO, G. CIFUENTES, E. HERNÁNDEZ, D. AGUILAR. 2015. Imaging Fractures beneath a Residential Complex Using Novel 3-D Electrical Resistivity Arrays. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 20/3: 219-233.<sup>2</sup>
- GARDUÑO-MONROY, V. H., E. ARREYGUE-ROCHA, I. ISRADE-ALCÁNTARA, G. M. RODRÍGUEZ-TORRES. 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 18/1: 37-54.
- LOKE, M. H. 2010. *2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Tutorial. <http://www.geotomosoft.com/>.
- LOKE, M. H., R. D. BARKER. 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting* 44/3: 499-523.
- RAMÍREZ-MONTES, G. 1987. *La escuadra y el cincel: documentos sobre la construcción de la Catedral de Morelia*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- RAMÍREZ-ROMERO, E. 1985. *Morelia en el espacio y en el tiempo*. Morelia: Gobierno del Estado de Michoacán.
- TEJERO-ANDRADE, A., G. CIFUENTES, R. E. CHÁVEZ, A. E. LÓPEZ-GONZÁLEZ, C. DELGADO-SOLÓRZANO. 2015. L and CORNER arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative in urban zones. *Near Surface Geophysics* 13/4: 355-367.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440312003858>.

<sup>2</sup> <https://doi.org/10.2113/JEEG20.3.219>.

<sup>3</sup> <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015015>.

## RESEARCH ADVANCE

# ARCHAEOMAGNETIC STUDY OF THE EDIFICIO DE LAS COLUMNAS COMPLEX, EL TAJIN, MESOAMERICA

## *Estudio arqueomagnético del complejo del Edificio de las Columnas, El Tajín, Mesoamérica*

**Jaime Urrutia-Fucugauchi,<sup>1</sup> Arturo Pascual-Soto,<sup>2</sup>  
Daniel Flores-Gutiérrez,<sup>3</sup> Ligia Pérez-Cruz<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Laboratorio de Paleomagnetismo y Paleoambientes, Instituto de Geofísica, UNAM, México;

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM, México; <sup>3</sup> Instituto de Astronomía, UNAM, México  
(juf@geofisica.unam.mx)

**ABSTRACT.** *We report the initial results of an archaeomagnetic study on ceramic samples from the Edificio de las Columnas architectonic complex, located in the northern sector of El Tajin, an archaeological site. Measurements of magnetic properties include low-field susceptibility, direction and intensity of natural remanent magnetization, magnetic hysteresis, temperature-dependent susceptibility, isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition curves and back-field demagnetization of saturation IRM. We studied the vectorial composition and stability of remanent magnetization using alternating field and thermal demagnetization. Magnetic carriers are fine-grained titanomagnetites and magnetite with pseudo-single domain states. Characteristic magnetizations are determined from the high-temperature unblocking spectra. Determinants of paleointensity, which meet quality criteria, have high and low values. Possible explanations include alterations during thermal treatments and secondary overprints. The influence of alterations and the multivectorial magnetizations of overlapping spectra require detailed analysis to estimate the paleointensities.*

**KEYWORDS:** *Archaeomagnetism, magnetic properties, Mesoamerica, Edificio de las Columnas, Tajin Chico, El Tajin.*

**RESUMEN.** *Reportamos resultados del estudio arqueomagnético en muestras de cerámicas en el complejo arquitectónico del Edificio de las Columnas, localizado en el sector norte de El Tajín. Las mediciones de propiedades*



Figure 1. Partial view of excavation in Building 40, Edificio de las Columnas architectonic complex, El Tajin.

*Recibido: 5-11-2017. Aceptado: 14-11-2017. Publicado: 24-11-2017.*

*magnéticas incluyen susceptibilidad magnética, dirección e intensidad de la magnetización remanente natural, histéresis, variación de la susceptibilidad con temperatura, curvas de adquisición de magnetización isoterma y desmagnetización por campos directos de la magnetización isoterma de saturación. La composición vectorial y estabilidad de la magnetización remanente se investigaron por desmagnetización por campos magnéticos alternos y por temperatura. Las magnetizaciones muestran dos componentes que residen en titanomagnetitas y magnetita, con traslape en los espectros de temperaturas de bloqueo. Las determinaciones de paleointensidad, que cumplen con los criterios de calidad, presentan valores altos y bajos. Posibles factores involucrados son alteraciones durante los tratamientos térmicos y la presencia de magnetizaciones secundarias. La influencia de alteraciones y de magnetizaciones multivectoriales que residen en arreglos con espectros que traslapan requiere de análisis detallados para la estimación de paleointensidades.*

**PALABRAS CLAVE:** *arqueomagnetismo, propiedades magnéticas, Mesoamérica, Edificio de las Columnas, Tajín Chico, El Tajín.*

## INTRODUCTION

The archaeological site El Tajin flourished in the northeastern sector of Mesoamerica from about ~200 to 900–1250 AD. The site has attracted considerable interest, with several studies undertaken over the years since the eighteenth century, particularly in the past decades (Pascual-Soto 1990, 2006; Piña-Chan and Castillo-Peña 1999). El Tajin is distinguished by its architecture and location, with the use of terraces and impressive building complexes. Here we present initial results of an archaeomagnetic study of the Edificio de las Columnas (Palace of Columns) in El Tajin Chico. The architectonic complex was built on a terraced platform at the northern zone of the archaeological site. It underwent several constructive phases, which were completed in the 10th century. The building is characterized by a central patio and the remains of several columns with representations of scenes and persons, including one representing the Ruler 13 Rabbit.

Archaeomagnetic studies have been successfully used for characterization and provenance studies and for dating and correlation of archaeological remains. The success of archaeomagnetism depends on the wide range of magnetic properties spanning several orders of mag-

nitude and on remanent magnetization records of the direction and intensity of the Earth's magnetic field. Recent developments on the directional and intensity reference curves and fitting/correlation methods have been reported. These are coupled with newly developed laboratory techniques, which improve the resolution and precision of archaeomagnetic dating (e.g. Pavón-Carrasco *et al.* 2014; Terán-Guerrero *et al.* 2016).

As part of the archaeological projects in El Tajin (Pascual-Soto 2013), paleointensity studies using the double-heating Thellier method are being carried out on samples from the Edificio de las Columnas building complex. The Thellier experiments give high-quality analytical data, but with distinct high 52.6  $\mu\text{T}$  and low 37.2  $\mu\text{T}$  paleointensities. This study on the magnetic properties and vectorial nature of the remanent magnetization record grew from the need to evaluate the contrasting results. We focus on magnetic properties and the paleodirectional record of the archaeomagnetic samples.

## SAMPLES AND METHODS

Description of the archaeological excavation projects in El Tajin is given in Pascual-Soto (1990, 2006, 2013). The Edificio de las Columnas consists of four platforms built on a larger platform. The inner patio of the complex has stairs with sculptures and mural paintings. The ceramic samples were collected from the K3/2012 excavation unit at the II-III layer-contact in Building 40 (substructure 2) of the Edificio de las Columnas complex (Fig. 1).

The low-field magnetic susceptibility was measured with the Bartington susceptibility MS2 system equipped with the MS2E sensor. Additional measurements were made with the MS2B dual-frequency sensor. The intensity and direction of the natural remanent magnetization (NRM) were measured with the RS-6 spinner magnetometer. Samples are unoriented and NRM directions are plotted in sample coordinates. The vectorial composition was analyzed using alternating field (AF) and thermal demagnetization. AF demagnetization was carried out up to maximum fields of 100 mT in a Molspin demagnetizer. Thermal demagnetization was carried out in 10–12 steps up to maximum temperatures of 600 °C in a Schonstedt thermal demagnetizer. Directions are analyzed using Zijderveld vector plots and end-point analysis. The variation of magnetic susceptibility with temperature was deter-

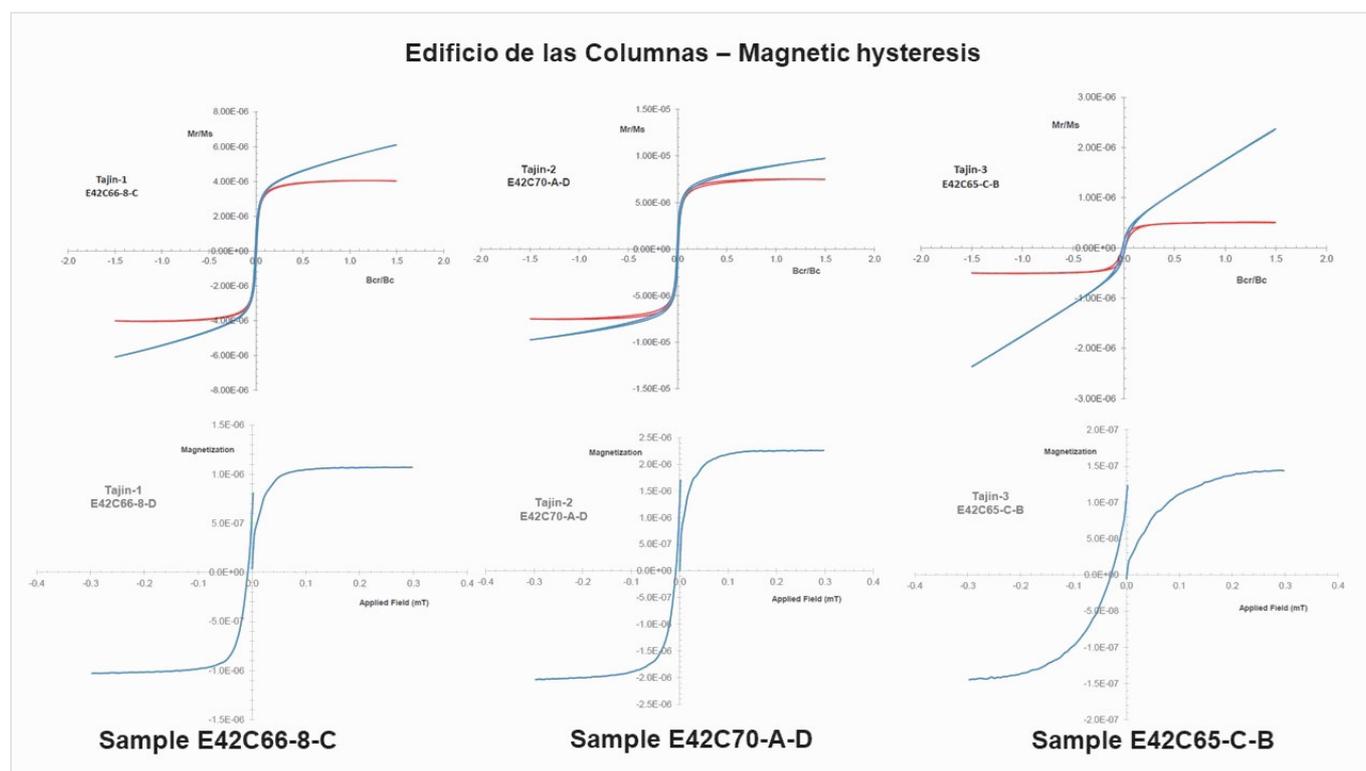


Figure 2. Magnetic hysteresis data, with hysteresis loops shown before (blue) and after (red) the slope correction. The relative contributions of paramagnetic minerals can be estimated from the slope of the hysteresis loops before correction (blue curve). The acquisition curves of isothermal remanent magnetization (IRM) and the back-field demagnetization of saturation IRM are included in the bottom diagrams.

mined using the Bartington high-temperature unit. Susceptibility-temperature curves were measured continuously from room temperature up to 600 °C or 700 °C during heating and cooling. The magnetic hysteresis loops and the isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition curves and back-field demagnetization of saturation IRM were determined with the MicroMag system in fields up to 1.5 tesla. Domain states are investigated using the magnetization (Mr/Ms) versus coercivity (Bcr/Bc) ratio plots (Day *et al.* 1977; Dunlop 2002).

## MAGNETIC PROPERTIES

The low-field magnetic susceptibility ranges from 20 up to 1430  $10^{-4}$  SI. The NRM intensity varies from 2.2 A/m to 2–4 mA/m. High Koenisberger Q ratios indicate dominance of remanent magnetizations with respect to induced magnetizations.

The hysteresis loops show variable contents of paramagnetic minerals, as indicated on the varying slopes in the loops (Fig. 2). The hysteresis loops show saturation in low fields, suggesting fine grained titanomag-

netites. Samples plot in the pseudo-single domain field in the Day magnetization vs. coercivity ratios plot. The Mr/Ms and Bcr/Bc ratios after paramagnetic correction vary from  $\sim 0.15$  to  $\sim 0.23$  and from  $\sim 1.23$  to  $\sim 2.14$ , respectively. Remanent Mr intensities range from  $\sim 70$  to  $\sim 1450$  nA/m<sup>2</sup> and Bcr coercivities range from  $\sim 6$  to  $\sim 14$  mT. In the magnetization vs. coercivity ratio plot, samples fall in the pseudo-single domain field (Fig. 3a). Magnetization and coercivity ratios are plotted for measurements taken before and after the thermal treatment for the paleointensity determinations.

Changes of magnetic susceptibility as a function of temperature indicate a Curie temperature of  $\sim 545$  °C, with distributed spectra above 300 °C (Fig. 3b). The susceptibility-temperature curves for the samples show varying magnetic susceptibilities, with most samples showing weak susceptibilities. The Curie temperature and distributed spectra indicate poor-titanium titanomagnetites and magnetite.

Thermal demagnetization documents multi-vectorial magnetizations, with secondary components and a high-temperature component interpreted as the characteristic remanence (Fig. 4). The magnetization components reside in fine-grained iron-titanium oxide

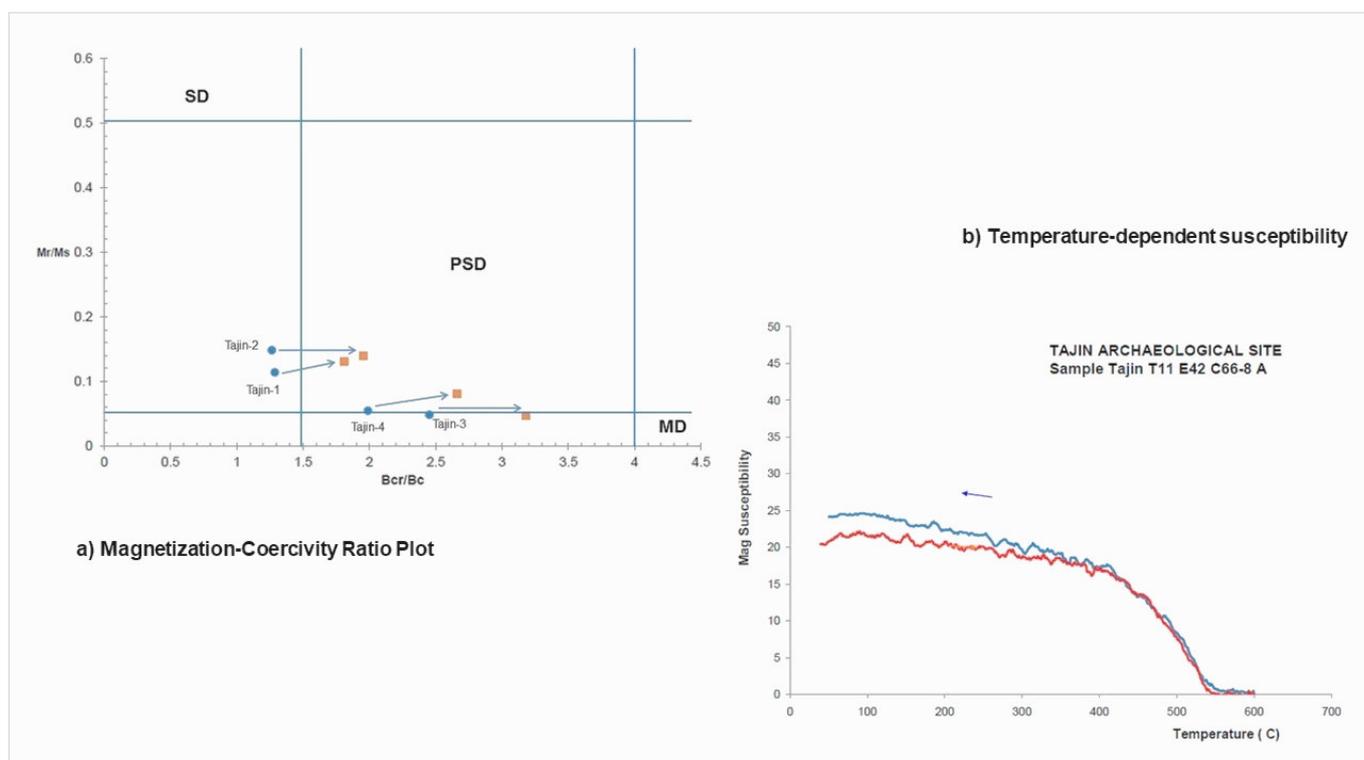


Figure 3. (a) Day diagram of domain states, with magnetization  $Mr/Ms$  ratios plotted as a function of coercivity  $Bcr/Bc$  ratios. Domain fields correspond to: SD, single domain, PSD, pseudo-single domain and MD, multidomain. Samples fall in the pseudo-single domain field. Hysteresis ratios are plotted for samples before and after the thermal treatment for the paleointensity determination double-heating cycles. (b) Variation of magnetic susceptibility as a function of temperature (red curve is the heating cycle and blue curve is the cooling cycle).

minerals with overlapping unblocking temperature ranges. The characteristic component is defined by linear fits going through the vector plot origin, with the unblocking spectra distributed towards high temperatures.

## DISCUSSION

El Tajin is characterized by its architectural development, with the building complexes and sculptures (Pascual-Soto 1990, 2006; Piña-Chan and Castillo-Peña 1999). The Morgadal Grande project investigates urban development and construction stages, with studies on the Edificio de las Columnas architectonic complex focusing on the late constructive phases. The archaeomagnetic study is intended to provide further constraints on the chronology, using the paleointensity method, which on burned clays generally provide reliable chronologies. In the Tajin study, despite the high-quality analytical results, high  $52.6 \mu\text{T}$  and low  $37.2 \mu\text{T}$  values were obtained. The differences do not permit us to constrain the chronology from correlation to the reference curve (Korte *et al.* 2009; Pavón-

Carrasco *et al.* 2014). Accurate paleointensity determinations depend on a number of factors, including the stability and vectorial composition of the remanent magnetization. Evaluation of the analytical results prompted this study, aimed to characterize the rock magnetic properties and the nature of the paleodirectional record.

Thermal demagnetization shows two component magnetizations, with overlapping unblocking temperature spectra. Characteristic components are isolated in the high-temperature range, above  $450^\circ\text{C}$  (Fig. 4). The unblocking temperature spectra are distributed, indicating a range in iron-titanium composition. The variation of magnetic susceptibility with temperature shows a Curie temperature around  $545\text{--}550^\circ\text{C}$ , indicating poor-Ti titanomagnetites with no other major phases (Fig. 3b). The temperature-dependent susceptibility curves up to  $600^\circ\text{C}$  indicate generation of small amounts of magnetite upon heating and cooling. Temperature treatment required for the paleointensity determination, with the double-heating Thellier method, results in chemical alteration, with formation of magnetite. The domain states as inferred from the magnetization vs. coercivity ratio plot fall in the pseudo-single

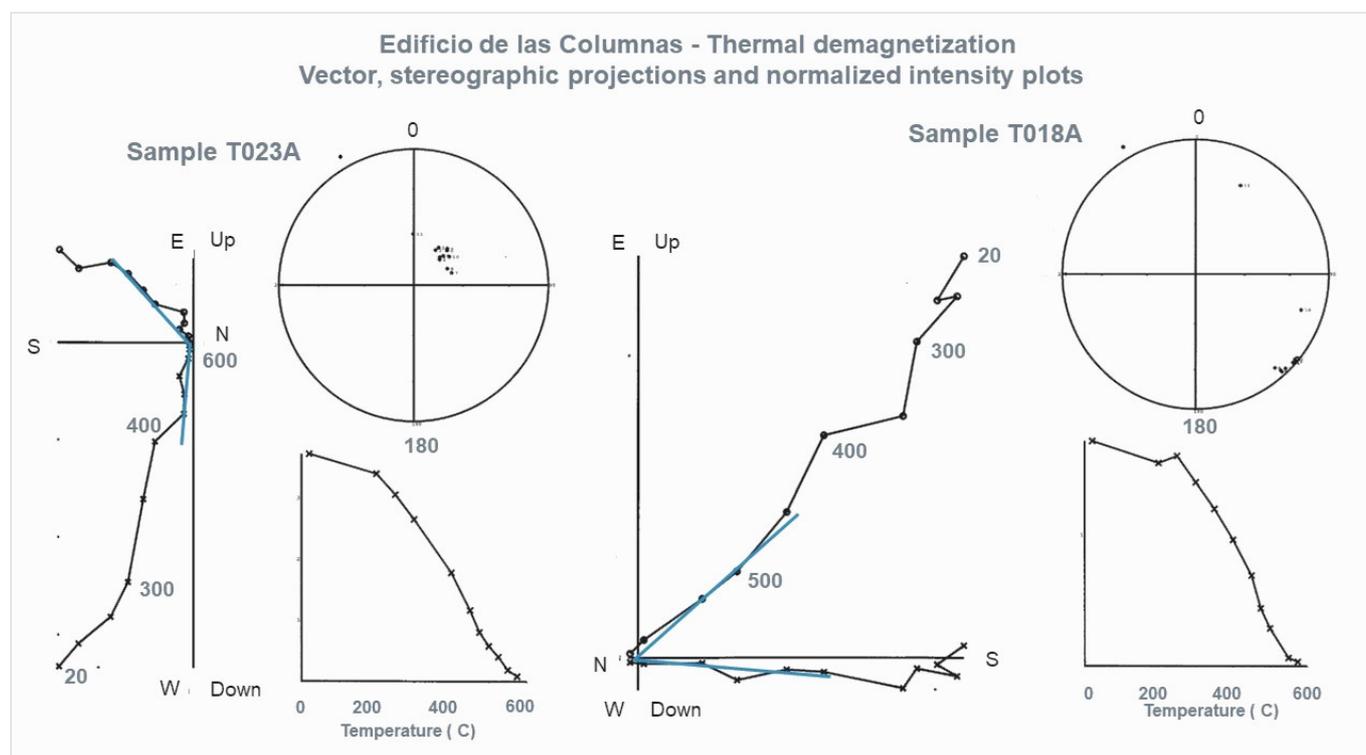


Figure 4. Thermal demagnetization of ceramic samples. The changes in direction and intensity of the remaining magnetization are plotted in stereographic projections, Zijderveld vector plots and normalized intensity diagrams. The characteristic magnetization, estimated by least-square fitting of demagnetization data points going through the plot origin is indicated in the diagrams.

domain field, with low magnetization ratios (Fig. 3a). After heating to 600 °C, the coercivity ratios increase, with little change in the magnetization ratios. The changes are associated with increase in the remanent coercivity and influence of multidomain particles. Magnetic hysteresis and temperature-dependent susceptibility indicate samples had not been stabilized during previous heating/cooling cycles. The magnetic hysteresis loops indicate variable contents of paramagnetic minerals (indicated by the differences in the loops before and after paramagnetic slope corrections). Saturation is reached at low coercivities, compatible with fine-grained titanomagnetites (Fig. 2). Samples with high paramagnetic mineral contents show saturation at higher coercivity values.

Archaeomagnetism has been successfully applied to provenance and characterization, and for dating and correlation of Mesoamerican archaeological remains (e.g. Urrutia Fucugauchi *et al.* 2016; Terán-Guerrero *et al.* 2016). Archaeomagnetic sourcing and dating depend on the wide range of magnetic properties and on the accuracy of remanent magnetization records (Kostadinova-Avramova and Kovacheva 2013; Schnepf *et al.* 2016). Analysis of Tajin ceramic samples highlight the difficulties in interpretation.

The construction phases for the Edificio de las Columnas expanded the building over time, to conform to plans of Tajin Rulers and/or to adapt the construction according to astronomical orientations. The Tajin Chico presents a distinct orientation that contrasts with the other constructions constrained by topographic relief. The complex has an orientation of  $\sim 105^{\circ} 25'$ , associated with the beginning of the Mesoamerican year (Flores-Gutiérrez 2013). The expansion of El Tajin took place between 850 to 1250 AD, with the construction stages of Edificio de las Columnas in the interval between 850 to 950 AD. For the first and second millennia, reference curves are less well constrained, which limit accurate correlations. Improved paleointensity determinations from Tajin samples are required to constrain the chronology.

## CONCLUSIONS

Archaeomagnetic studies have been undertaken on the Edificio de las Columnas complex, one of the most emblematic in El Tajin archaeological site. The complex was built on several stages on a large terraced platform overlooking the site. Demagnetization results

indicate that ceramics preserve characteristic remanent magnetizations, residing in fine-grained titanomagnetites. Secondary overprints show overlapping unblocking temperature spectra. Alterations during thermal treatment and the two-component nature of remanent magnetization may explain the range in archaeointensity values obtained. Magnetic susceptibility, NRM and IRM intensities and micromagnetic hysteresis data show varying contents of paramagnetic minerals and fine-grained poor-Ti titanomagnetites with pseudo-single domain states. These results highlight the importance of detailed rock magnetic mea-

surements for sample selection and interpretation of paleointensity data. Further analyses on a wider sample collection are needed to expand the paleomagnetic characterization and constrain the chronology of the building complex.

### Acknowledgments

Study forms part of the UNAM projects in El Tajin archaeological site. We acknowledge the technical assistance of Víctor Macías, Miguel Ángel Díaz, Mariana Marca and Martín Espinosa.

### REFERENCES

- DAY, R., M. FULLER, V.A. SCHMIDT. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 13: 260–267.
- DUNLOP, D.J. 2002. Theory and application of the Day plot ( $M_{is}/M_s$  versus  $H_a/H_c$ ) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107/B3: EPM 4-1–EPM 4-22.
- FLORES-GUTIÉRREZ, D. 2013. Significantes astronómicos desde edificios orientados. *Revista Digital Universitaria* 14/6. <http://revista.unam.mx/vol.14/num6/art13/>.
- KORTE, M., F. DONADINI, C.G. CONSTABLE. 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka: 2. A new series of time-varying global models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10: Q06008. <https://doi.org/10.1029/2008GC002297>.
- KOSTADINOVA-AVRAMOVA, M., M. KOVACHEVA. 2013. The magnetic properties of baked clays and their implications for past geomagnetic field intensity determinations. *Geophysical Journal International* 195/3: 1534–1550.
- PASCUAL-SOTO, A.  
 — 1990. El Tajín: la evolución de una antigua ciudad mesoamericana. *Revista de la Universidad de México* 469–470: 46–49.  
 — 2006. *El Tajín: en busca de los orígenes de una civilización*. Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM, INAH, 407 pp.  
 — 2013. *El Tajín. Memoria de Excavaciones. Proyecto Arqueológico Morgadal Grande 2002-2004*. Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM, México, 212 pp.
- PAVÓN-CARRASCO, J., M. OSETE, J.M. TORTA, A. DE SANTIS. 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters* 388: 98–109.
- PIÑA-CHAN, R., P. CASTILLO-PEÑA. 1999. *Tajín: la ciudad del dios Huracán*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 85 pp.
- SCHNEPP, E., R. LEONHARDT, M. KORTE, J. KLETT-DRECHSEL. 2016. Validity of archaeomagnetic field recording: an experimental pottery kiln at Coppengrave, Germany. *Geophysical Journal International* 205: 622–635.
- TERÁN-GUERRERO, A., A. GOGUITCHAICHVILI, R. ESPARZA, J. MORALES, J. ROSAS-ELGUERA, A. SOLER, E. CÁRDENAS, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI. 2016. A detailed rock-magnetic and archaeomagnetic investigation on wattle and daub building (Bajareque) remains from Teuchitlan tradition (NW Mesoamerica). *Journal of Archaeological Science: Reports* 5: 564–573.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., A. GOGUITCHAICHVILI, L. PÉREZ-CRUZ, J. MORALES. 2016. Archaeomagnetic dating of the eruption of Xitle volcano, basin of Mexico: Implications for the Mesoamerican centers of Cuicuilco and Teotihuacan. *Arqueología Iberoamericana* 30: 23–29.

ACABOSE DE IMPRIMIR  
LA PRIMERA EDICIÓN DE LA MONOGRAFÍA  
AVANCES EN ARQUEOMAGNETISMO  
Y GEOFÍSICA APLICADA I  
EL DÍA 14 DE SEPTIEMBRE DEL AÑO 2018 EN EL  
LABORATORIO DE ARQUEOLOGÍA TEÓRICA,  
GRAUS, ESPAÑA.

ISSN 2254-187X



9 772254 187004



04