

RESEARCH ARTICLE

HORNOS DE CAL DE MONTE ALBÁN, MÉXICO: ESTUDIO COMBINADO DE ESPECTROMETRÍA DE INFRARROJO ATR-FTIR Y ARQUEOMAGNETISMO

Lime Kilns from Monte Alban, Mexico: Combined ATR-FTIR Infrared Spectrometry and Archaeomagnetism Study

Soledad Ortiz,¹ Nelly M. Robles García,² Oscar G. de Lucio,³ Avto Goguitchaichvili,⁴ Dante García Ríos,² Rubén Cejudo,⁴ Miguel Cervantes,⁴ Juan Morales,⁴ Rafael García⁴

¹ Estancia Posdoctoral-CONACYT, Instituto de Geofísica, UNAM, Unidad Michoacán, Campus Morelia, México;

² Centro INAH Oaxaca, México; ³ Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural-Instituto de Física, UNAM, Ciudad de México, México; ⁴ Servicio Arqueomagnético Nacional, Instituto de Geofísica, UNAM, Unidad Michoacán, Campus Morelia, México (olucio@ciencias.unam.mx)

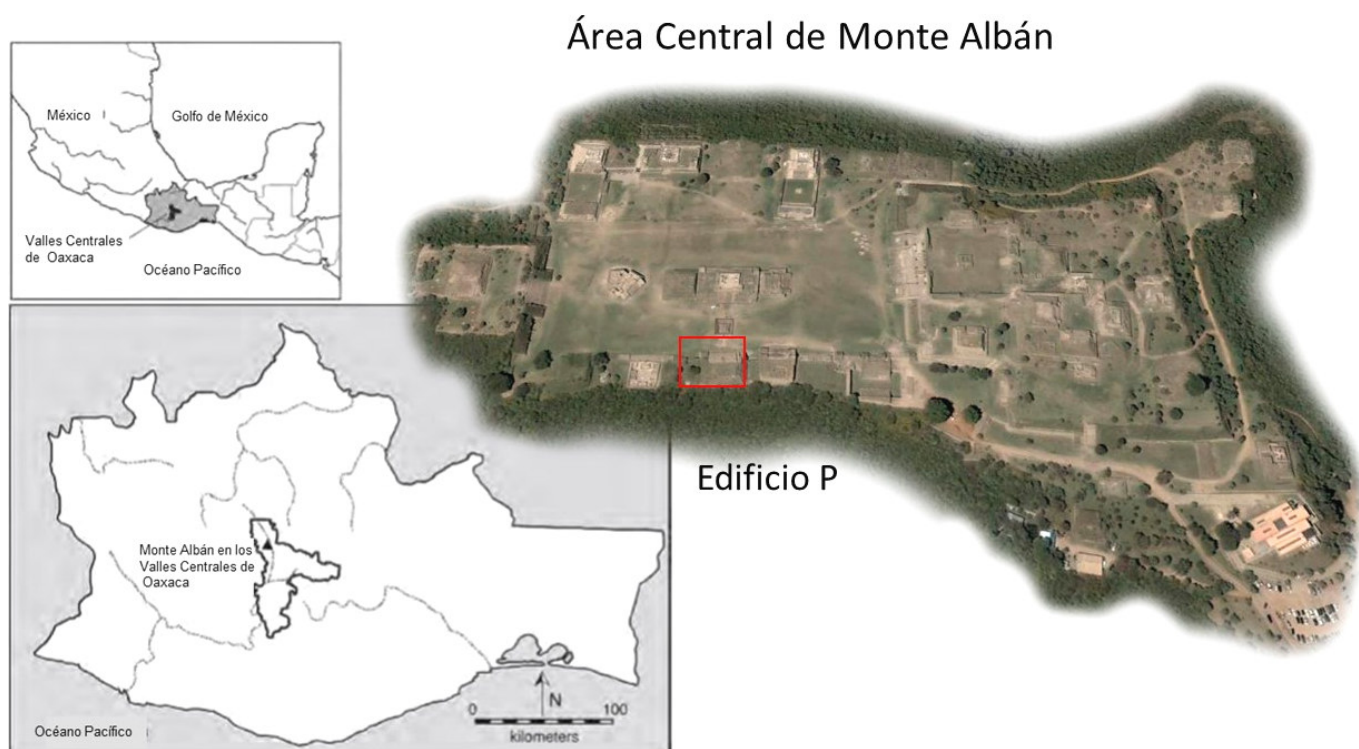


Figura 1. Ubicación del Edificio P en el área central de Monte Albán, México.

RESUMEN. *Los hornos de cal pueden proporcionar una importante información arqueológica sobre la producción de cal y su papel en la sociedad. Si bien se llevaron a cabo numerosas investigaciones arqueométricas en el área maya, aún no se dispone de tales estudios para el valle de Oaxaca. En este trabajo presentamos un análisis combinado de arqueomagnetismo y espectrometría infrarroja de dos hornos de cal recientemente descubiertos en Monte Albán. Se utilizó*

Recibido: 30-7-2021. Modificado: 31-7-2021. Aceptado: 24-8-2021. Publicado: 4-9-2021.

Edited & Published by Pascual Izquierdo-Egea. Arqueol. Iberoam. Open Access Journal.
License CC BY 3.0 ES. <https://n2t.net/ark:/49934/253>. <http://purl.org/aia/4803>.

el método ATR-FTIR para estimar las temperaturas de calcinación. El rango de temperatura estuvo entre 750 y 800 °C para la gran mayoría de las muestras. El primer horno intervenido —cuyas paleodirecciones medias determinadas sobre 7 muestras (de un total de 15 tratadas) son $Inc = 31.46^\circ$, $Dec = 350.18^\circ$, $\alpha_{95} = 2.5^\circ$, $k = 578$ — arroja un posible intervalo de edad entre 1076 y 1321 AD. Para el segundo horno de cal (6 determinaciones de un total de 14 muestras tratadas y con $Inc = 18.08^\circ$, $Dec = 2.64^\circ$, $\alpha_{95} = 2.9^\circ$, $k = 543$), el intervalo correspondiente está entre 713 y 883 AD. Las fechas más tempranas corresponden probablemente al momento de la última época de construcciones y el «abandono» de Monte Albán. La producción de cal fue menor en el tiempo posterior y, en apariencia, servía únicamente para realizar el mantenimiento de los edificios importantes.

PALABRAS CLAVE. Monte Albán; Oaxaca; hornos de cal; arqueometría; arqueomagnetismo; espectrometría infrarroja.

ABSTRACT. Lime kilns can provide important archaeological information about lime production and its role in society. Although numerous archaeometric investigations were carried out in the Maya area, such studies are not yet available for the Valley of Oaxaca. This paper presents a combined archaeomagnetism and infrared spectrometry analysis of two lime kilns recently discovered at Monte Alban. The ATR-FTIR method was used to estimate the calcination temperatures. The temperature range was between 750 and 800 °C for the vast majority of samples. The first kiln involved—whose mean paleodirections determined on 7 samples (out of a total of 15 treated) are $Inc = 31.46^\circ$, $Dec = 350.18^\circ$, $\alpha_{95} = 2.5^\circ$, $k = 578$ —yields a possible age range between 1076 and 1321 AD. For the second lime kiln (6 determinations out of a total of 14 treated samples and with $Inc = 18.08^\circ$, $Dec = 2.64^\circ$, $\alpha_{95} = 2.9^\circ$, $k = 543$), the corresponding interval is between 713 and 883 AD. The earliest dates probably correspond to the time of the last construction period and the “abandonment” of Monte Alban. Lime production was lower in the later time and apparently only served for the maintenance of important buildings.

KEYWORDS. Monte Alban; Oaxaca; lime kilns; archaeometry; archaeomagnetism; infrared spectrometry.

INTRODUCCIÓN

En Mesoamérica, la producción de cal ha evidenciado una tecnología compleja y la convivencia de distintos métodos de calcinación de la roca caliza: uno perecedero, como las piras, que deja pocas o nulas huellas en el registro arqueológico; y otro formal, como los hornos, cuyo registro arqueológico muestra una estructura arquitectónica. La especialización y la estandarización en la producción de cal apenas son reconocibles a través de los estudios arqueométricos. La utilización del fuego como medio para transformar materiales nos indica la presencia de artesanos que contaban con el conocimiento empírico de cómo manejar el fuego, la cantidad de combustible que debía utilizarse y el tiempo durante el cual debían ser expuestos esos materiales.

El uso de hornos para la producción de cal ha sido reportado desde el periodo Neolítico Precerámico B (Goren y Goring-Morris 2008). En Mesoamérica tenemos hornos del periodo Formativo en Tepeaca (Castanzo y Anderson 2004), del Clásico en Chalcatzingo (Grove y Cyphers Guillén 1987), así como diversos sitios del área maya datados arqueomagnéticamente entre el Clásico y el periodo histórico (Ortiz *et al.* 2021).

En este trabajo presentamos los resultados de los análisis llevados a cabo en dos hornos localizados en la ciudad de Monte Albán, capital del Estado zapoteca del valle de Oaxaca (Robles *et al.* 2020), cuyo periodo de auge se ha situado en el Clásico Temprano (Minc *et al.* 2016; Walker 2016).

DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS

Como parte de las exploraciones del *Proyecto de conservación de los edificios dañados por los sismos del 2017 en Monte Albán y Atzompa (INAH)*, se excavó en diciembre de 2020 el desplante del muro sur del primer cuerpo del Edificio P con la finalidad de liberar y restaurar una posible banqueta que se había identificado en el extremo sureste del edificio, gracias a los trabajos de *resistivimetría* eléctrica desarrollados por el arqueólogo Osvaldo Sterpone. Estos estudios determinaban una posible acumulación de humedad en el área, lo que era perjudicial para la conservación de la ladera este del edificio (Robles *et al.* 2020) (figura 1).

Ese espacio ya había sido objeto de exploraciones arqueológicas previas; una de ellas fue realizada por Jorge



Figura 2. Elemento 1 y Elemento 2 en el lado sur del Edificio P. Se observa la Plaza Central de Monte Albán (vista general desde el noreste).

Acosta en 1946 como parte de los trabajos del proyecto de investigación y puesta en valor que desarrollaba Alfonso Caso en Monte Albán (Caso 2003: 355-414). Por su parte, el Dr. Marcus Winter, quien encabezó el *Proyecto Especial Monte Albán 992-1994 (PEMA 92-94)*, exploró y restauró los muros que delimitaban el lado sur del Edificio P (Winter 1994). Sin embargo, en ambos proyectos no se mencionó a qué profundidad se excavó y qué elementos fueron hallados.

Al realizar la excavación mediante dos calas extensivas (cala 0 y cala 1), se identificó que en los cuadrantes N1E3-E2 se encontraban rocas calizas de entre 10 y 30 cm de largo por 10 cm de ancho, que estaban acomodadas formando un círculo de 2.05 m de diámetro a 35 cm de profundidad, identificándose esta evidencia arquitectónica como Elemento 1. Dicho elemento se encontraba entre el límite de la capa I, que se caracterizó como una capa alterada de coloración negra con alto contenido de humus, y el inicio de la capa II, que correspondía a una capa de color blanco con presencia de pequeñas rocas de cal, la mayoría de las cuales evidenciaban ser cal viva no hidratada.

En el interior del Elemento 1 se encontró el piso del mismo a 45 cm respecto del nivel de la hilada superior, mientras que en el extremo noroeste del mismo se hallaban algunas rocas acomodadas de manera circular, unidas con lodo, que fueron interpretadas como un pilar de rocas de aproximadamente 1.20 m de diámetro, construido tras el desuso o modificación del Elemento 1 (figuras 2, 3, 4 y 5a).

En el cuadrante N3E5 se descubrió otro alineamiento de rocas de entre 10 y 15 cm de largo por 10 cm de ancho, dispuestas en forma elíptica con un diámetro menor de 1.60 m y un diámetro mayor de 2 m. Este elemento arquitectónico, identificado como Elemento 2, se encontró a 25 cm de la superficie y presentaba en su interior capas de lodo con fragmentos reducidos de cal viva sin hidratar y restos pequeños de carbón. Se excavó la mitad este del horno para identificar la profundidad del mismo, a 1.20 m por debajo del nivel de la hilada superior que definía este elemento arquitectónico (figuras 2, 3 y 5b).

En los cuadrantes N3E7 y N3E8 se identificaron unas rocas dispuestas en medialuna que correspondían

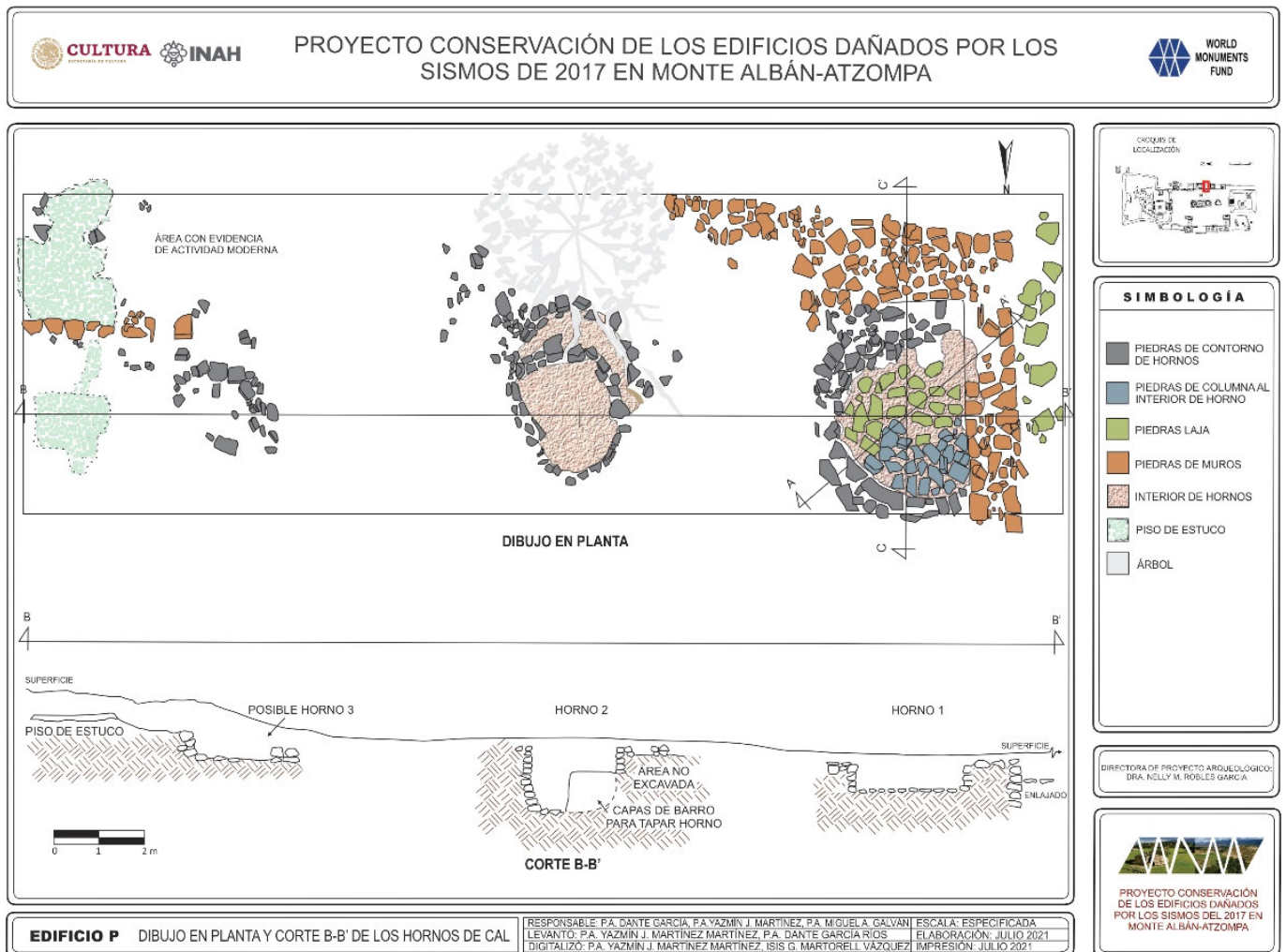


Figura 3. Dibujo en planta y corte de este a oeste de los elementos hallados en la exploración arqueológica. Se definen las dimensiones y el contexto de los hornos 1 y 2.

al desplante de un elemento arquitectónico que había sido afectado o destruido. Este conjunto de rocas, considerado como Elemento 3, se encontraba a 20 cm de la superficie, en el límite entre las capas I y II. Por otra parte, la excavación permitió identificar alineamientos y restos de pisos de estucos en los cuadrantes N3E9 y N3E10, los cuales se encontraban a 10 cm de la superficie, como única evidencia de la banqueta que existió para delimitar el lado sur del Edificio P y su relación con una aparente unidad habitacional que estuvo en el espacio intermedio entre el Palacio y el Edificio P (figuras 2 y 3). Los elementos 1 y 2 fueron identificados como hornos contruidos para la quema o producción de cal, mientras que no se pudo determinar si el elemento 3 correspondía a un tercer horno, ya que no se contaba con elementos suficientes (figura 3).

La exploración de los cuadrantes N2E1, N2E2, N2E3 y N3E1, que corresponden al entorno del Horno 1, permitió identificar dos muros que delimitaban

el lado sur y oeste de un cuarto cancelado para colocar sobre el mismo la banqueta que se conserva en los cuadrantes N3E9, N3E10 y N2E10. El piso de estuco de estos cuadros se encuentra a 15 y 25 cm por encima del nivel de los hornos 2 y 1, respectivamente, por lo cual se infiere que, tras la colocación de la banqueta, los zapotecos rompieron la misma y excavaron en el espacio para construir los hornos (figuras 3, 4 y 5a).

En base a la disposición del piso de estuco que se conservaba en un nivel superior al de los hornos 1 y 2 y el Elemento 3, identificamos la reutilización del espacio en las dos últimas etapas constructivas del área nuclear de Monte Albán. Por lo tanto, la evidencia del Horno 1 nos permite determinar que se reutilizaron el piso y las paredes este y sur del cuarto, de un momento constructivo anterior o una subestructura, posiblemente correspondiente a la primera mitad del Clásico Tardío o época IIIB-IV de Monte Albán (650-950 AD). El pilar que se encuentra en el extremo norte y en el inte-

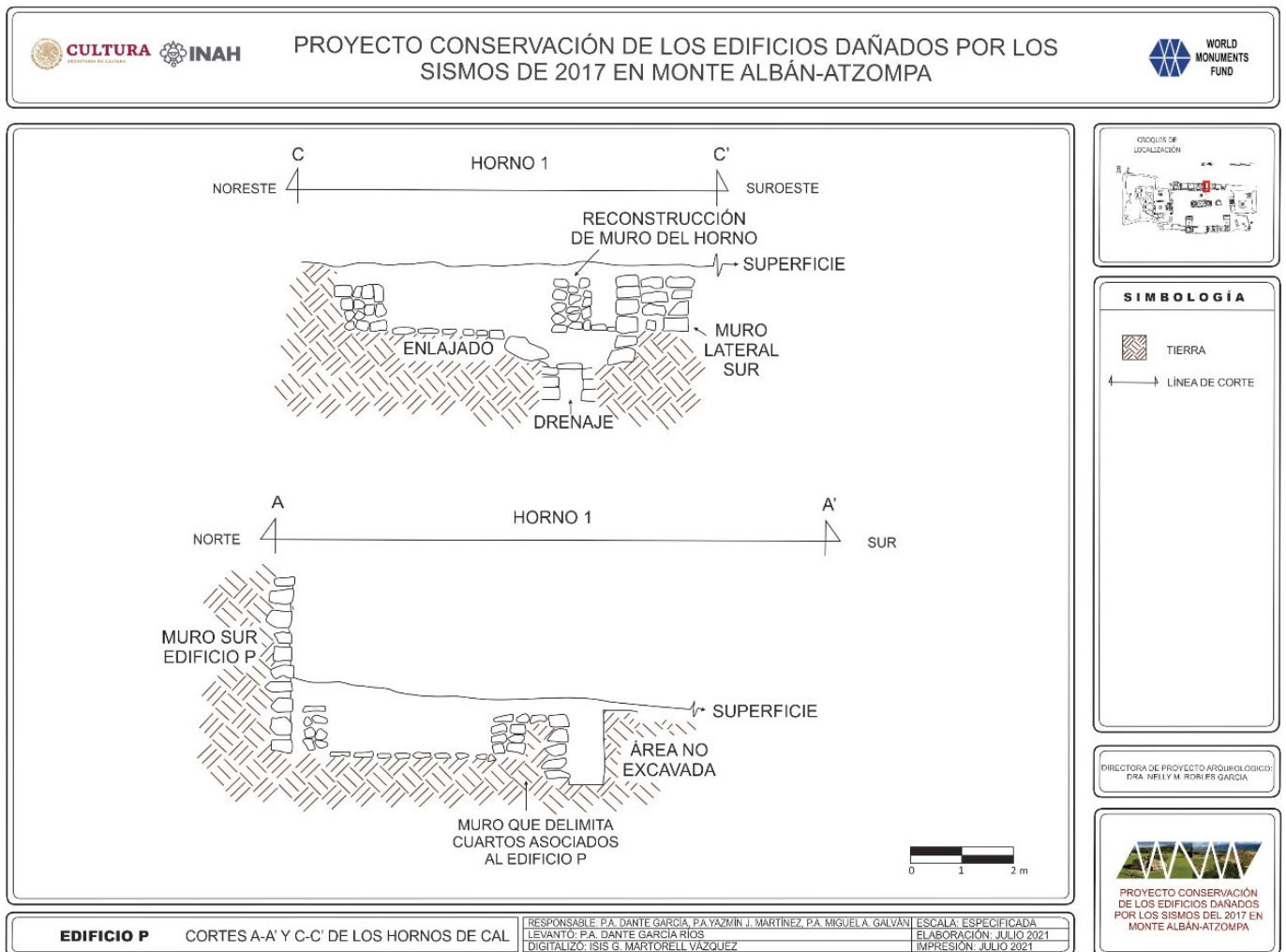


Figura 4. Dibujo en perfil de los cortes A-A' y C-C' que definen el Horno 1.

rior del Horno 1 (figura 3) facilita identificar que este horno fue cancelado para reutilizar el espacio una tercera vez. En el extremo sureste de dicho horno se halló tierra suelta, piedras y barro tapando un pequeño derrumbe donde, al ser excavado, se encontraron rocas con evidencia de exposición al fuego o calcinación, pero que formaban parte de la delimitación de un drenaje colapsado, el cual se localizaba a 20 cm por debajo del nivel del piso o apisonado de piedras. Al identificar que las rocas que delimitaban el lado este y oeste del drenaje presentaban evidencia de calcinación, al igual que las rocas que se encontraban hundidas en la parte oeste del horno, se planteó la hipótesis de que una de las técnicas empleadas en estos hornos de cal era la reutilización de drenajes para que el aire que circulaba por ellos entrara al horno y aumentara, de esa manera, la temperatura en el interior del mismo (figuras 4 y 5a).

Por otra parte, el Horno 2 presenta evidencias de, al menos, tres modificaciones arquitectónicas definidas por los muros de medialuna que lo delimitan, las cua-

les parecen tener la finalidad de reducir el tamaño del horno. Los lados oeste y norte fueron los muros que no sufrieron modificaciones, mientras que, hacia el lado sur y este, el muro se fue cerrando, por lo que las evidencias más antiguas quedaron indicadas como muros «exteriores» de forma anular (figuras 3 y 5b). Quizá, con el paso del tiempo, la cal que se produjo fue menor y, por lo tanto, se requería un espacio más pequeño para gastar menos combustible.

En ambos hornos (1 y 2) las rocas de sus muros y pisos presentan evidencia de calcinación, algunas más que otras, por lo cual se infiere que parte de la dinámica de mantenimiento o reparación de los hornos consistía en reponer las rocas o espacios donde las rocas que delimitaban los muros habían sufrido daños. Es importante mencionar que en el interior de los hornos se localizaron algunos fragmentos rojos, posiblemente formaciones de arcillas con exposición a altas temperaturas, por lo que nos podrían indicar zonas donde el fuego era más intenso o adquiriría mayor temperatura. Asimismo-

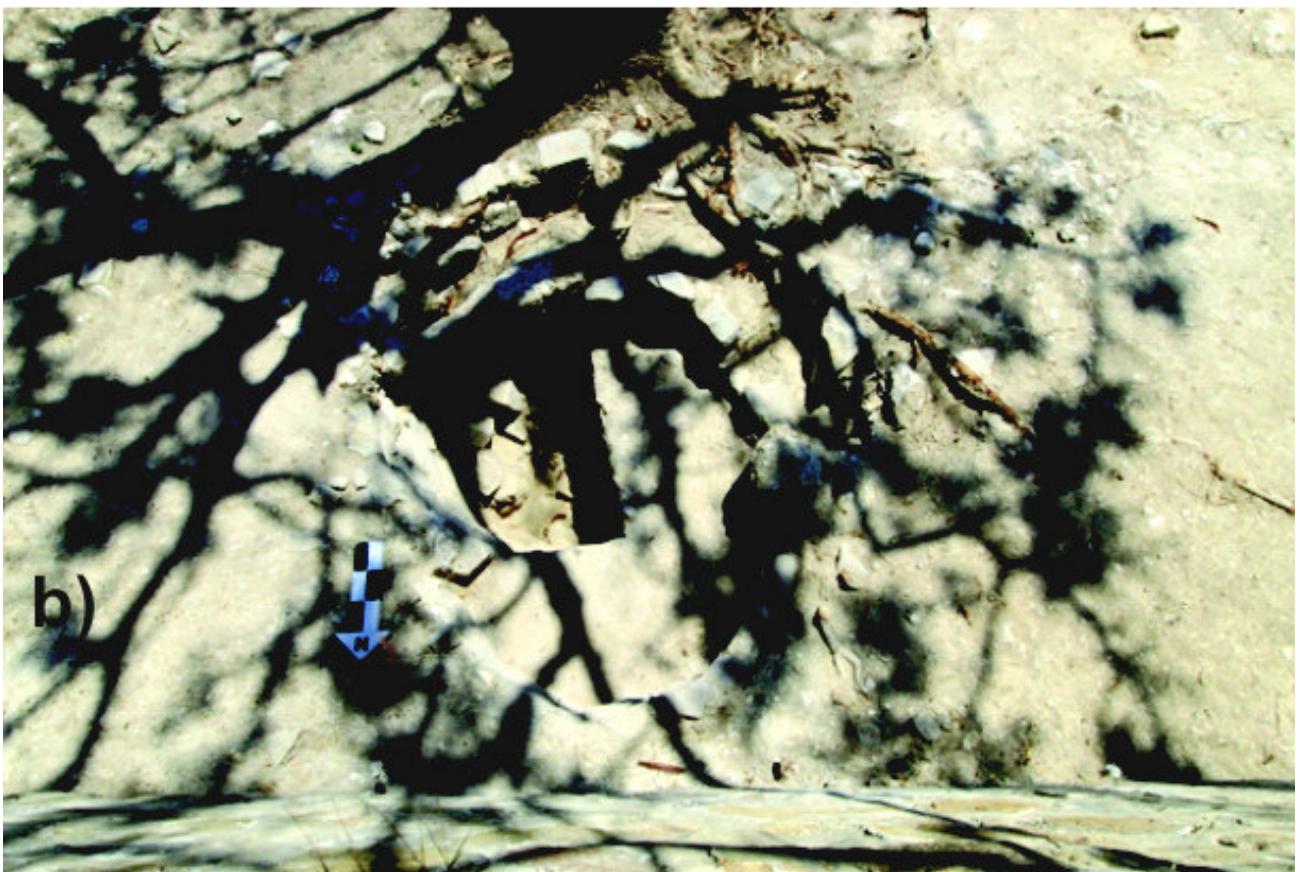


Figura 5. a) Elemento 1: vista general desde el noroeste; se aprecian las piedras del muro interior y exterior, así como el «piso» de piedra. b) Elemento 2: vista general en planta del horno; se observa el doble muro que lo conforma.

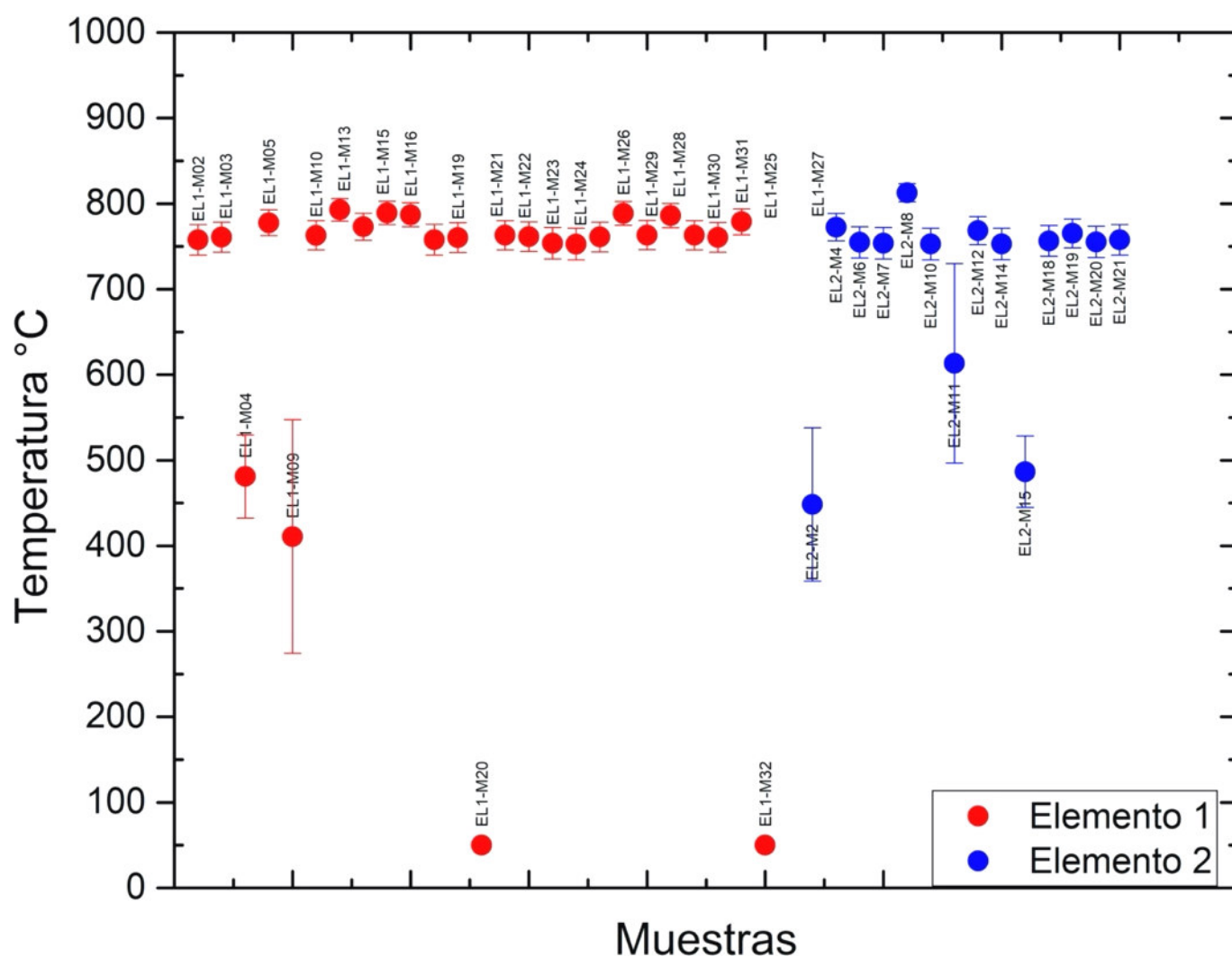


Figura 6. Gráfica donde se registran las temperaturas obtenidas mediante el análisis de espectrometría de infrarrojo ATR-FTIR de las muestras analizadas pertenecientes a los muros, sedimentos y concreciones de material blanco localizados en el interior de los hornos.

mo, las paredes de las estructuras presentaban indicios de calcinación y, al tomar las muestras, se apreció el cambio de coloración a tonos grises-rojizos en las rocas (figura 5b).

PALEOTEMPERATURAS

Los análisis arqueométricos fueron llevados a cabo en 53 muestras pertenecientes a los muros, sedimentos y concreciones de materiales blancos recolectados en el interior de las estructuras arqueológicas identificadas como hornos 1 y 2.

Las muestras se analizaron mediante espectrometría de infrarrojo con transformada de Fourier en modo de reflectancia total atenuada (ATR-FTIR). La preparación de cada muestra consistió en el molido en un mortero con pistilo de ágata; al término de la molienda, el pol-

vo fue depositado en un *ependorf* para su posterior análisis. Después de la pulverización de cada muestra, el análisis se llevó a cabo en un espectrómetro portátil *Bruker Alpha Platinum* en modo ATR con cristal de diamante. Los espectros fueron obtenidos a una resolución de 4 cm^{-1} y 32 *scans* en el intervalo de $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ en números de onda. Estas mediciones fueron llevadas a cabo en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural-Instituto de Física, UNAM.

La identificación mineralógica de los espectros se realizó mediante la detección de las bandas presentes en comparación con los materiales de referencia certificados por el *National Institute of Standards and Technology*, SMR88b y SMR1D, y se consultó la base de datos de Chukanov (2014). Para el cálculo de las paleotemperaturas, se siguió la metodología propuesta por Regev *et al.* (2010) y Chu *et al.* (2008), utilizando la curva de

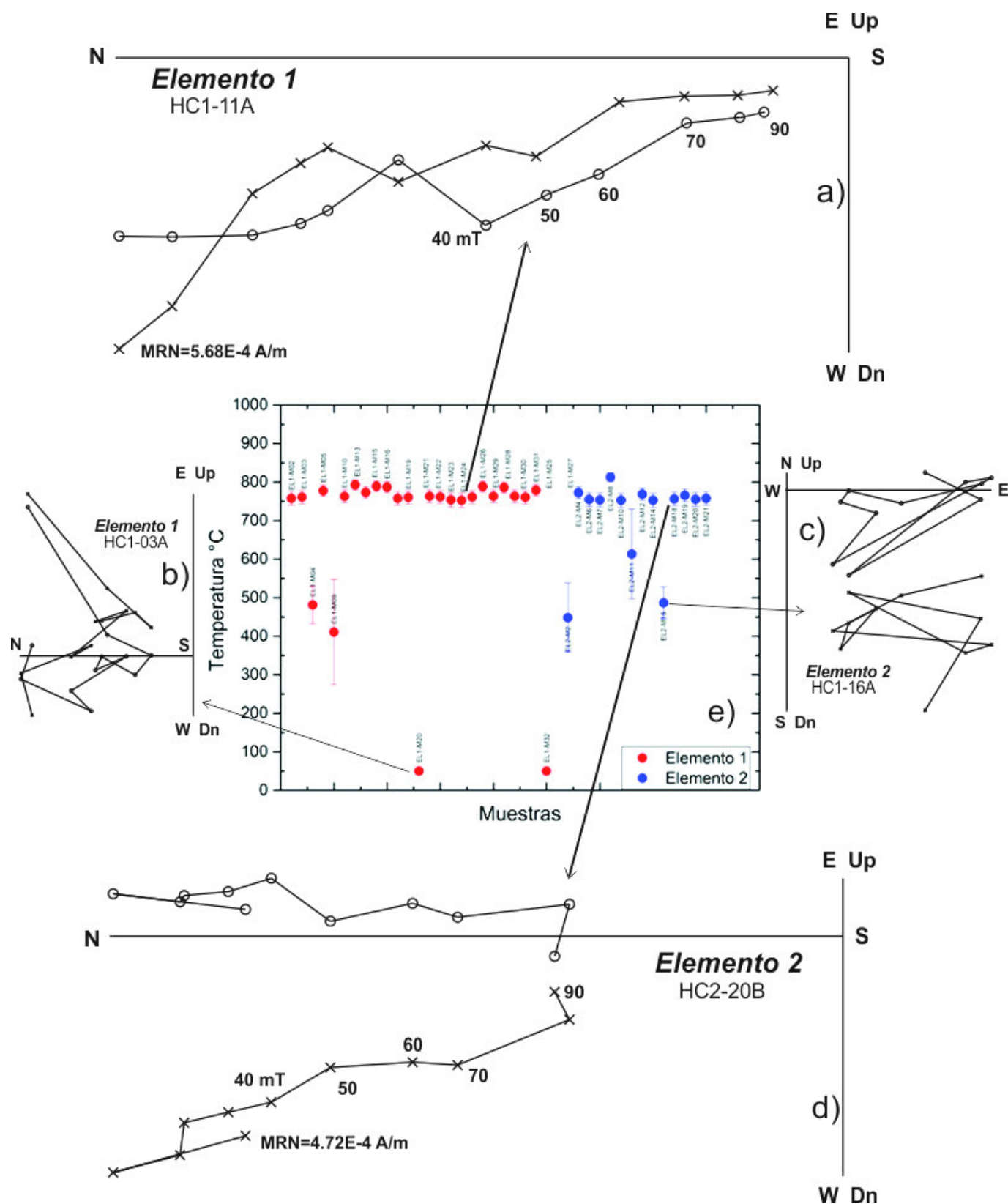


Figura 7. Proceso de desmagnetización por campos alternos hasta 90 mT (diagramas ortogonales representativos de ambos elementos) en paleotemperaturas obtenidas mediante espectrometría de infrarrojo (e).

calibración de temperaturas de materiales calizos desarrollada por Ortiz Ruiz (2019).

Los resultados de los análisis mineralógicos nos indican la presencia de calcita en la mayoría de las mues-

tras, así como la existencia de aluminosilicatos relacionada con una arcilla no identificada. Esperamos que los análisis de XRD nos permitan identificar esta arcilla. La presencia del fuego en el interior del horno se

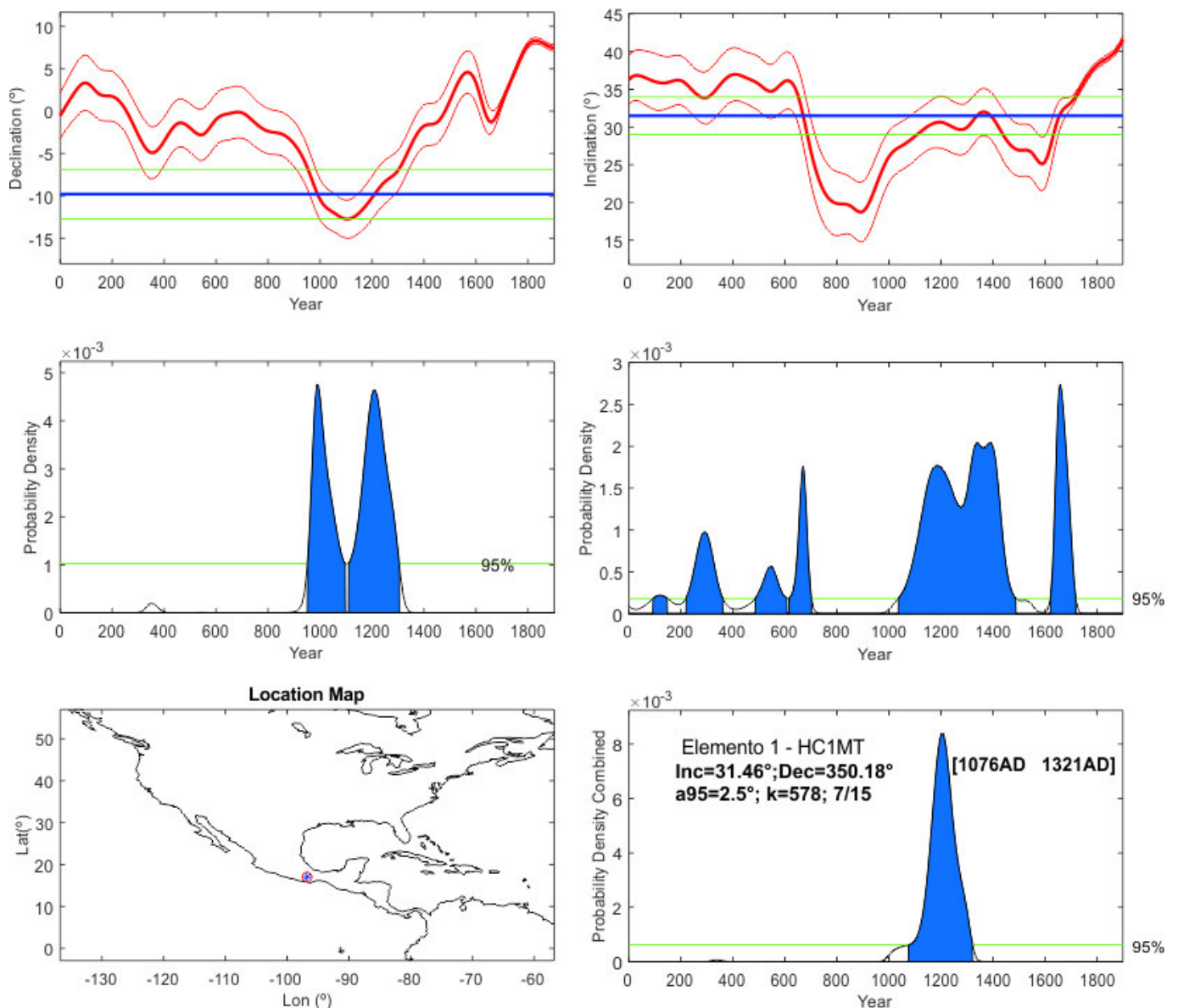


Figura 8a. Datación arqueomagnética del Elemento 1 usando el modelo geomagnético *SHA.DIF.14k* (Pavón-Carrasco *et al.* 2011, 2014).

sugiere mediante el uso de la espectrometría de infrarrojo, pues la utilización de la curva de calibración permitió identificar temperaturas entre 750 y 800 °C en la mayoría de las muestras, es decir, en el intervalo de temperaturas conocidas para la producción de cal (figura 6).

El Elemento 1 presenta, en dos muestras tomadas en la primera y segunda hilera del muro, temperaturas entre 400 y 500 °C. Dos muestras son identificadas como material geogénico sin exposición al fuego y se ubican en el borde superior de la primera hilera de piedra del muro, la cual se encontraba en contacto con la superficie del terreno. Las restantes 21 muestras arrojan temperaturas entre 753 y 789 °C. Siete muestras no pudieron ser utilizadas para identificar las paleotemperaturas

al no cumplir los criterios metodológicos. Las muestras descartadas poseían un componente arcilloso mayoritario mezclado con calcita. En el Elemento 2 se tomaron 21 muestras en total, 15 de las cuales fueron viables para la identificación de temperaturas. Una muestra correspondió a material geogénico, dos muestras se encontraron en el rango de 400 °C, una muestra en el rango de 600 °C y 11 muestras se hallaron entre 753 y 813 °C.

ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO

Las mediciones magnéticas se realizaron en las instalaciones del Servicio Arqueomagnético Nacional de la

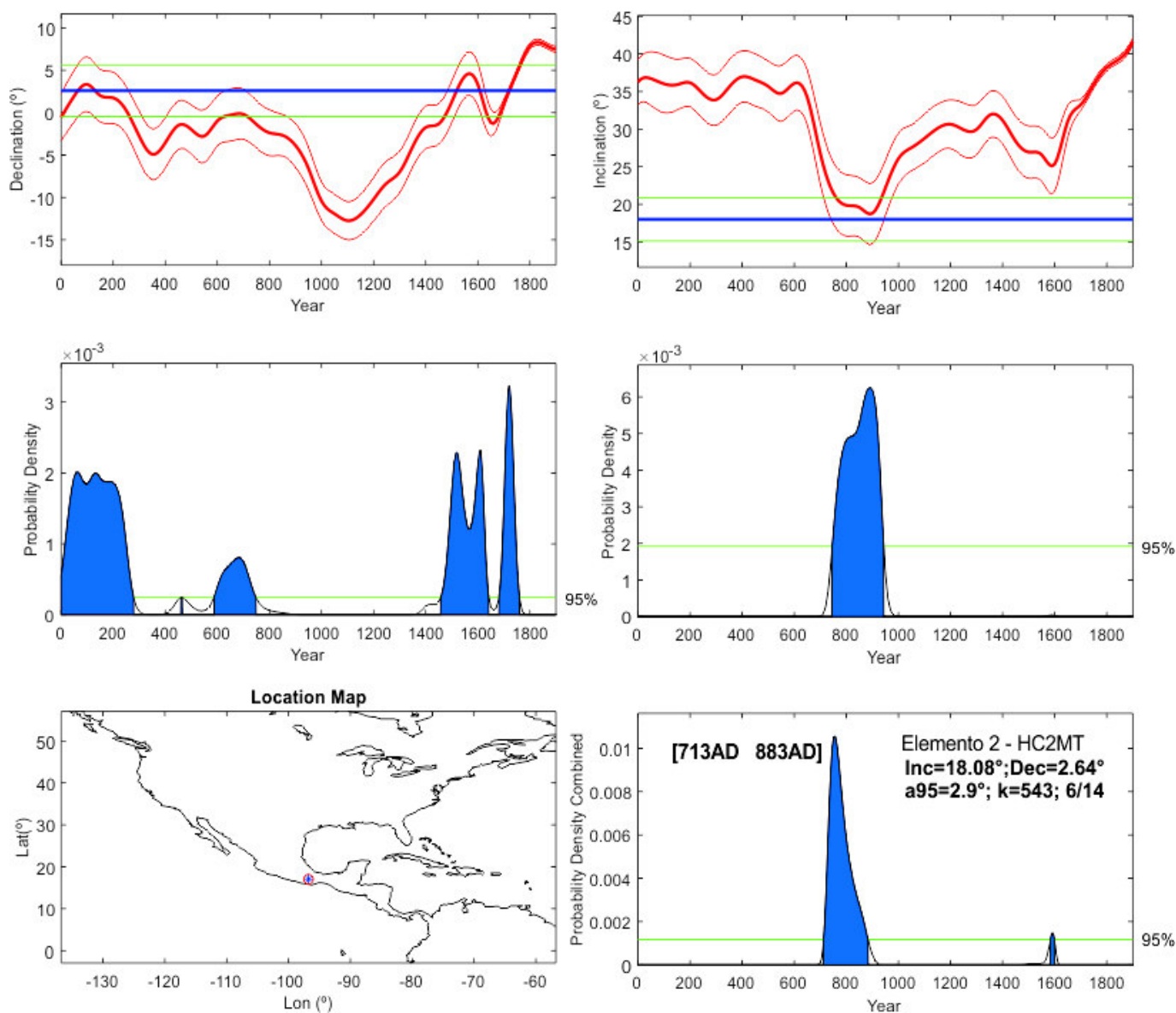


Figura 8b. Datación arqueomagnética del Elemento 2 usando el modelo geomagnético *SHA.DIF.14k* (Pavón-Carrasco *et al.* 2011, 2014).

Universidad Nacional Autónoma de México en Morelia, México. Para disminuir el efecto de la magnetización remanente viscosa, las muestras se almacenaron durante dos semanas en un espacio libre de campo magnético ambiente.

Para determinar las paleodirecciones medias características (primarias), se optó por el tratamiento de campos alternos utilizando un desmagnetizador *LDA5 (AGICO)* hasta un máximo de 90 mT. La remanencia magnética se midió usando un magnetómetro tipo *spinner AGICO JR6*. Las paleodirecciones individuales a nivel de espécimen se determinaron mediante el método de regresión lineal (Kirschvink 1980). Y los parámetros estadísticos asociados se calcularon utilizando la estadística de Fisher (1953).

Los experimentos arrojaron patrones complejos en general (figura 7), resultando imposible, en muchas ocasiones, poder obtener direcciones medias primarias debido al proceso caótico de desmagnetización sin definir componentes lineales (figura 7b, 7c). Cabe señalar que son muestras que provienen de zonas con paleotemperaturas menores a 500 °C y, por lo tanto, no portan una magnetización termorremanente completa. En contraste, las muestras (figura 8a, 8d) provenientes de zonas de altas paleotemperaturas detectadas (cerca de 800 °C) permiten definir las inclinaciones y declinaciones medias a partir de 40 mT. Las determinaciones de las magnetizaciones remanentes características se basan, en la mayoría de los casos, sobre 6 puntos alineados tendentes al origen, mostrando los valores de

máxima desviación angular (MAD por sus siglas en inglés) dentro de 2.5° (figura 8a, 8d).

Para la datación arqueomagnética, utilizamos el modelo *SHA.DIF.14k* y el *software MATLAB* de Pavón-Carrasco *et al.* (2011, 2014). El intervalo de datación arqueológica se eligió entre 0 y 1900 AD en base a consideraciones arqueológicas generales (figura 8). El Elemento 1 —cuyas paleodirecciones medias determinadas sobre 7 muestras (de un total de 15 tratadas) son $Inc = 31.46^\circ$, $Dec = 350.18^\circ$, $\alpha_{95} = 2.5^\circ$, $k = 578$ — arroja un posible intervalo de edad entre 1076 y 1321 AD. Para el Elemento 2 (6 determinaciones de un total de 14 muestras tratadas, con $Inc = 18.08^\circ$, $Dec = 2.64^\circ$, $\alpha_{95} = 2.9^\circ$, $k = 543$), el intervalo correspondiente está entre 713 y 883 AD.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La presencia de hornos para la producción de cal en Monte Albán es un hallazgo importante, ya que no se han registrado hornos de cal en investigaciones previas y se vincula con los estudios sobre la tecnología de la construcción en Mesoamérica, definiendo las particularidades empleadas por los zapotecos que habitaron Monte Albán en el proceso de producción de cal, concretamente en el periodo de la ocupación tardía de esta urbe. Las dos estructuras circulares (anulares) halladas eran semisubterráneas, es decir, una parte de ellas se encontraba bajo el nivel superficial y otra parte de las mismas estaba, aparentemente, a cielo abierto.

Desafortunadamente, el espacio donde se hallaron los hornos ha sido objeto de exploraciones previas (Caso 2003; Winter 1994) que impiden obtener pruebas de la arquitectura original que tuvieron los hornos. Sin embargo, la evidencia recopilada del Horno 1 permite identificar que, al menos en este horno, se utilizó un drenaje en desuso con la finalidad de introducir oxígeno en el proceso de combustión y aumentar así la temperatura en el interior del horno. No sabemos cuándo aparece esta técnica, pero por lo menos se puede afirmar que estaba en uso entre los años 1076 y 1321 AD según las dataciones arqueomagnéticas realizadas con las muestras del Horno 1. La presencia de cal en Oaxaca ha sido reportada previamente por Marcus y Flannery (1996: 83-87), quienes describieron la existencia de hoyos que contenían cal y pisos hechos de este material para el sitio de San José Mogote, rasgos que son datados entre 1400-1150 AC. Sin embargo, la presencia de hornos para cal no había sido demostrada para la zona

del valle de Oaxaca en periodos posteriores a las fechas reportadas por Marcus y Flannery.

Las dinámicas de producción de la cal en Mesoamérica van revelando la presencia de una pirotecnología donde conviven piras y hornos para su producción. La diferenciación entre el uso de unos u otros es sugerida por la naturaleza productiva de la cal. Siendo esta una actividad especializada, pues el manejo del fuego en el interior de un horno requirió un conocimiento avanzado sobre el fuego y el material a calcinar, estas dinámicas de producción pirotecnológica son ampliamente utilizadas en los hornos de cerámica, los cuales han sido reportados previamente en otras áreas del valle de Oaxaca y fechados en el periodo Formativo (Minc *et al.* 2016). Se sugiere que el uso de los hornos para la producción de cal en Oaxaca pudo derivar del empleo de hornos para cocer cerámica, abriendo nuevamente el debate sobre el origen de la tecnología de producción de cal, donde se ha propuesto que el área maya es la cuna de la producción de cal (Barba Pingarrón 2013; Villaseñor Alonso y Barba Pingarrón 2012).

Los resultados de las paleotemperaturas permiten registrar una distribución térmica de los muros, los sedimentos del interior y las zonas más profundas de los hornos con temperaturas alrededor de los $750-800^\circ\text{C}$, que indican un proceso de estandarización y especialización de la producción de cal en esos hornos al registrarse una homogeneización de la exposición al fuego, tanto en la estructura como en los materiales de su interior. La ubicación de los hornos dentro de la plaza principal de Monte Albán nos permite proponer un control de la producción de cal realizado por la élite del sitio, caso similar a la producción cerámica (Walker 2016). Sin embargo, no contamos en Monte Albán con mayores evidencias arqueológicas reportadas para la producción de cal en hornos, por lo cual estos contextos analizados son los primeros de su tipo en Oaxaca.

La evidencia de los hornos de producción de cal en la zona central de Monte Albán, asociados a un edificio de tipo religioso, se corresponde con los ejemplos reportados para Chalcatzingo (Grove y Cyphers Guillén 1987) y el área maya (Seligson *et al.* 2019). Las evidencias arqueométricas nos indican la presencia de calcita y temperaturas vinculadas a la calcinación de la roca caliza para producir cal. La exposición entre $750-800^\circ\text{C}$ es suficiente para transformar la roca caliza en óxido de calcio, el cual produce una pasta de cal al hidratarse.

La distancia a la que se encuentran los hornos respecto a la Plaza Central ha sido registrada ampliamente

te en diferentes sitios arqueológicos del área maya (Ortiz Ruiz 2019; Seligson 2016; Šprajc *et al.* 2017) y se entiende en Monte Albán como una clara necesidad de los zapotecos para obtener cal destinada a las modificaciones arquitectónicas de sus edificios y, según los registros arqueológicos de las temporadas 2019 y 2020, de una gran obra al alterar y fortalecer estructuralmente la ladera este del Edificio P. Denota también la participación e influencia de la «clase» sacerdotal en el manejo y control de las obras de construcción, así como en el uso de los espacios urbanos y habitacionales, al romper la banqueta del lado sur del Edificio P y reutilizar los cuartos de las subestructuras de este espacio para atender la necesidad de la producción de cal.

La calidad y tecnología empleada en el Horno 1, así como las modificaciones observables en el Horno 2, que se han inferido como una reducción de las dimensiones, nos indican que en un primer momento se requirió una gran cantidad de cal, al menos hasta el instante previo a las primeras alteraciones del Horno 2; por lo que quizá la cal obtenida en este espacio servía para el mantenimiento y modificaciones de otros edificios del área central de la ciudad.

La reducción de las dimensiones en el Horno 2 son interpretadas como momentos en los que fue necesaria una menor cantidad de cal. Esta dinámica que sufrió el espacio del horno puede manifestar un cambio en la estructura social dominante, puesto que se expresa la disminución en la cantidad de cal producida y la pérdida de mano de obra, poder y control social al menos hasta el momento de desuso del Horno 2, el cual se sitúa, según los datos de la datación arqueomagnética, entre los años 713 y 883 AD.

Las fechas obtenidas para el Elemento 2 (Horno 2) pueden ser interpretadas como un momento de la última época de construcciones y el «abandono» de Monte Albán, el cual se puede definir, por la evidencia que presenta el Horno 1, como la pérdida de poder político, social y económico que ostentaban las élites dominantes, mientras que las actividades religiosas pudieron haberse mantenido durante un periodo prolongado de tiempo. Es evidente que este horno fue utilizado en la última época de construcción de Monte Albán (Monte

Albán IIIB-IV), a cuyo término fue suspendida la actividad productiva.

Por otra parte, las fechas de datación arqueomagnética reportadas para el Horno 1 (1076-1321 AD) nos indican que la producción de cal fue menor en el tiempo posterior al desuso del Horno 2. Quizá la producción de cal servía únicamente para realizar el mantenimiento del Edificio P y de otros edificios importantes que lo requirieran, por lo cual se contaba con una menor cantidad de mano de obra disponible, pero con el manejo de una importante técnica de oxigenación de la caldera para aumentar la temperatura en el interior del horno.

Por otro lado, la evidencia del pilar construido en el interior del Horno 1 nos indica el desuso del horno y una clara modificación del espacio, por lo que se puede inferir que un grupo de personas realizaba actividades en este espacio después del periodo 1076-1321 AD. Esta hipótesis se solapa parcialmente con las fechas obtenidas por Noreen Tuross (Robles *et al.* 2012), quien dató los contenidos osteológicos de la Tumba 7 por ¹⁴C con un promedio de fechas entre 1200 y 1400 AD. Esto sugiere que, en ese intervalo temporal, en Monte Albán hubo, por lo menos, dos tipos de actividad: uno fue la disposición de ofrendas en el interior de la Tumba 7 como una práctica ritual de veneración a los ancestros, probablemente en repetidas ocasiones; el otro consistió, a partir del año 1076, en la reactivación de la actividad constructiva en el Edificio P y, probablemente, en algunos otros edificios solo como actividades de mantenimiento tales como la reposición de juntas y estucos en las fachadas, quizás para reforzar muros contrafuertes, para lo cual se utilizó cal preparada en el Horno 1 (Elemento 1).

Las dataciones arqueomagnéticas obtenidas para finales del Clásico e inicios del Posclásico, corresponden a los datos previamente reportados en el área maya (Ortiz *et al.* 2021). Al estar registrada la última quema en dichos periodos, podemos sugerir que en Monte Albán, hasta ese momento, la producción de cal por medio de hornos se enmarca en las dinámicas productivas y cambios en los controles político-económicos del Estado zapoteco, después de su esplendor.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) el financiamiento otorgado a Soledad Ortiz en su estancia posdoctoral. Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto *Ciencia de Frontera* CONACYT 731762. Se agradece el apoyo del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investiga-

ción y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC), con sede en el Instituto de Física de la UNAM, a través de los proyectos CONACYT LN293904, LN299076 y LN314846; así como a la Zona Arqueológica de Monte Albán-INAH por las facilidades proporcionadas. Esta investigación fue apoyada financieramente por los proyectos CONACYT n.º 252149, CONACYT CF-2019-1761, UNAM-PAPIIT-IN101920 y UNAM-PAPIIT-IN113321.

REFERENCIAS

- BARBA PINGARRÓN, L. 2013. El uso de la cal en el mundo prehispánico mesoamericano. En *La cal: historia, propiedades y usos*, eds. L. Barba Pingarrón e I. Villaseñor Alonso, pp. 21-47. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas, Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A. C.
- CASO, A. 2003. *Exploraciones en Oaxaca. Quinta y sexta temporada 1936-1937*. Ciudad de México: El Colegio Nacional.
- CASTANZO, R. A.; J. H. ANDERSON. 2004. Formative period lime kilns in Puebla, Mexico. *Mexicon* 26: 86-90.
- CHU, V.; L. REGEV; S. WEINER; E. BOARETTO. 2008. Differentiating between anthropogenic calcite in plaster, ash and natural calcite using infrared spectroscopy: implications in archaeology. *Journal of Archaeological Science* 35, 4: 905-911.
- CHUKANOV, N. V. 2014. *Infrared Spectra of Mineral Species. Extended Library*. Springer.
- FISHER, R. A. 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 217, 1130: 295-305. Londres.
- GOREN, Y.; A. N. GORING-MORRIS. 2008. Early pyrotechnology in the Near East: Experimental lime-plaster production at the Pre-Pottery Neolithic B Site of Kfar HaHoresh, Israel. *Geoarchaeology: An International Journal* 23, 6: 779-798.
- GROVE, D. C.; A. CYPHERS GUILLÉN. 1987. The excavations. En *Ancient Chalcatzingo*, ed. D. C. Grove, pp. 21-55. Austin: University of Texas Press.
- KIRSCHVINK, J. L. 1980. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal International* 62, 3: 699-718.
- MARCUS, J.; K. V. FLANNERY. 1996. *Zapotec Civilization: How Urban Society Evolved in Mexico's Oaxaca Valley*. Londres: Thames & Hudson.
- MINC, L. D.; R. J. SHERMAN; C. ELSON; M. WINTER; E. M. REDMOND; C. S. SPENCER. 2016. Ceramic provenance and the regional organization of pottery production during the later Formative periods in the Valley of Oaxaca, Mexico: Results of trace-element and mineralogical analyses. *Journal of Archaeological Sciences Reports* 8: 28-46.
- ORTIZ, S.; A. GOGUITCHAICHVILI; V. A. KRAVCHINSKY; R. CEJUDO; O. DE LUCIO; F. BAUTISTA; A. VILLA; A. GÓNGORA; J. MORALES; L. BARBA PINGARRÓN. 2021. Maya limekilns as geomagnetic field recorders. *Journal of South American Earth Sciences* 109: 103284.
- ORTIZ RUIZ, M. S. 2019. *El conocimiento pirotécnológico de la sociedad maya prehispánica: estudio de los hornos para cal en las tierras bajas mayas del norte*. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de 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. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046>.
- 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, 2: 408-419.
- REGEV, L.; K. M. PODUSKA; L. ADDADI; S. WEINER; E. BOARETTO. 2010. Distinguishing between calcites formed by different mechanisms using infrared spectrometry: archaeological applications. *Journal of Archaeological Science* 37, 12: 3022-3029.
- ROBLES GARCÍA, N. M.; M. JANSEN; S. LÓPEZ ALONSO; A. I. RIVERA GUZMÁN; A. E. ANDRADE CUAUTLE; I. L. CÁZAREZ MUNGUÍA; D. GARCÍA RÍOS; H. I. LÓPEZ CALVO; J. C. JIMÉNEZ LÓPEZ; N. TUROSS. 2012. *Informe sobre los avances del proyecto de investigación «Aspectos recientes sobre la Tumba 7 de Monte Albán»*. Informe técnico aprobado por el Consejo de Arqueología del INAH.

- ROBLES GARCÍA, N. M.; O. STERPONE; J. HUCHIM HERRERA; C. D. GARCÍA RÍOS; E. GARCÍA WIGUERAS I.; M. A. GALVÁN BENÍTEZ; K. H. AGUILAR VÁZQUEZ; D. MARTÍNEZ TORRES; I. G. MARTORELL VÁZQUEZ; J. M. ZÚÑIGA; L. GARCÍA LALO. 2020. *Proyecto de conservación de los edificios dañados por los sismos del 2017 en Monte Albán-Atzompa*. Informe técnico aprobado por el Consejo de Arqueología del INAH.
- SELIGSON, K. E. 2016. *The Prehispanic Maya Burnt Lime Industry: Socio-Economy and Environmental Resource Management in the Late and Terminal Classic Period Northern Maya Lowlands (650-950 CE)*. Tesis doctoral. Madison: University of Wisconsin.
- SELIGSON, K. E.; S. ORTIZ RUIZ; L. BARBA PINGARRÓN. 2019. Prehispanic Maya Burnt Lime Industries: Previous Studies and Future Directions. *Ancient Mesoamerica* 30, 2: 199-219.
- ŠPRAJC, I.; L. A. T. DÍAZ; O. E. HOLGUÍN; A. MARSETIČ. 2017. *Paisaje arqueológico y dinámica cultural en el área de Chactún, Campeche (2016-2018): informe de la temporada 2017*. Liubliana: Centro de Investigaciones de la Academia Eslovena de Ciencias y Artes.
- VILLASEÑOR ALONSO, I.; L. BARBA PINGARRÓN. 2012. Los orígenes tecnológicos de la cal. *Cuicuilco* 19, 55: 11-41.
- WALKER, S. T. 2016. *Pottery, Politics, and Trade Routes: Evaluating Independence in Late Classic Jalieza, Oaxaca*. Tesis de maestría. Oregon State University.
- WINTER, M., COORD. 1994. *Proyecto Especial Monte Albán 1992-1994*. INAH.