

Espectrometría infrarroja y datación arqueomagnética de un horno de cal en la periferia de Dzibilchaltún, Mérida, Yucatán

Infrared spectrometry and archaeomagnetic dating from limekiln in the Dzibilchaltún outskirts, Mérida, Yucatán

Soledad Ortiz-Ruiz¹, Rafael García-Ruiz^{2,*}, Avto Goguitchaichvili², Oscar G. de Lucio³, Jaziel Aldair Murguía Salazar², Eva Vernet Tarragó⁴, Ángel Góngora Salas⁵, Francisco Bautista⁶, Juan Julio Morales-Contreras²

¹ Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México

² Servicio Arqueomagnético Nacional, Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional, Autónoma de México, Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, 58190, Morelia, Michoacán.

³ Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC), Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 Ciudad de México, México.

⁴ Laboratorio Paleomagnético, Universidad de Burgos, Hospital del Rey s/n - 09001 Burgos, España.

⁵ Centro INAH-Yucatán, Instituto Nacional de Antropología e Historia, calle 10 310A, Col. Gonzalo Guerrero, Mérida, Yucatán, 97119.

⁶ Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Michoacán, México

* Autor para correspondencia: (R. García Ruiz) r.garcia@igeofisica.unam.mx

Cómo citar este artículo:

Ortiz-Ruiz, S., García-Ruiz, R., Goguitchaichvili, A., de Lucio, O.G., Murguía Salazar, A., Vernet Tarragó, E., Góngora Salas, Á., Bautista-Zuñiga, F., Morales-Contreras, J.J., 2024, Espectrometría infrarroja y datación arqueomagnética de un horno de cal en la periferia de Dzibilchaltún, Mérida, Yucatán: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 76 (2), A170424. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2024v76n2a170424>

Manuscrito recibido: 19 de Octubre de 2023.

Manuscrito corregido: 2 de Abril de 2024.

Manuscrito aceptado: 16 de Abril de 2024.

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia [CCBY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

En años recientes la exploración de los hornos para cal en la península de Yucatán ha sido parte recurrente en los trabajos arqueológicos; durante el Salvamento Arqueológico, cerca de Chaactun, se halla un horno que presentaba abundante concreción de un material blanco que se denominó cal, durante las excavaciones se llevó a cabo el muestreo arqueométrico y arqueomagnético con la finalidad de corroborar los hallazgos arqueológicos. La conjunción de los resultados permitió estudiar desde todos los ángulos esta estructura y definir el momento de quema de cal, el momento de abandono y su afectación durante la reutilización del predio como rancho ganadero. Estos resultados nos indican la importancia de realizar ambos muestreos con la finalidad de integrar los resultados a la discusión teórica y metodológica del uso de estructuras de combustión en el área Maya.

Palabras clave: Horno de cal, Espectrometría de Infrarrojo, Arqueomagnetismo, área Maya.

ABSTRACT

In recent years, the exploration of lime kilns in the Yucatan Peninsula has been a recurring part of archaeological work. During the archaeological rescue at Chaactun locality, a kiln was found that presented abundant concretion of a white material presumably the lime. During the excavations, archaeometric and archaeomagnetic samplings were carried out in order to corroborate the archaeological findings. The combined investigation allowed us to study this structure from different perspective and to define the moment of lime burning, the moment of abandonment and its impact during the reuse of the property as a cattle ranch. These results indicate the importance of carrying out systematic samplings in order to integrate the results into the theoretical and methodological framework of the use of combustion structures in the Mayan area.

Keywords: Lime kiln, Infrared Spectrometry, Archaeomagnetism, Maya area.

1. Introducción

El estudio de los hornos de cal en el área Maya inició en la década de los 70's, sin embargo, la década pasada supuso un avance significativo en su caracterización, datación, estudio pirotécnológico, económico, así como su uso por los artesanos Mayas (Fauvet-Berthelot, 1986; Ortiz Ruiz *et al.*, 2015, 2021, 2023; Seligson *et al.*, 2019).

Previo al enfoque pirotécnológico, la producción de cal ha estado ligada al estudio de los materiales derivados, es decir, las mezclas de cal, los morteros, aplanados, lechadas, pisos entre otros; así como la caracterización de sus componentes (Barba Pingarrón, 2013; Guillot, 2014; Hansen, 2000; Hueda-Tanabe *et al.*, 2004; Straulino, 2015; Thibodeau, 2013).

Los resultados y avances en la investigación de la producción de cal en el área Maya han llegado a propuestas sobre la composición y diferenciación tecnológica, las temperaturas de calcinación de la cal utilizada en la preparación de pisos y morteros, avances que permitieron desarrollar el estudio pirotécnológico de los hornos de cal (Ortiz Ruiz *et al.*, 2023). En el caso de los hornos para cal, el estudio arqueométrico y la datación arqueomagnética han permitido establecer las temperaturas de calcinación alcanzadas al interior de los hornos y crear una curva de calibración de temperaturas de calcinación para materiales calizos (Ortiz Ruiz *et al.*, 2021, 2023).

El arqueomagnetismo ha jugado un papel muy importante en los estudios de cal en el área Maya, donde se han desarrollado más de cuatro estudios en los últimos años como los de Ortiz Ruiz *et al.* (2015, 2021), Goguitchaishvili *et al.* (2020) y Pantoja *et al.* (2020). La obtención de las direcciones e intensidades termorremanentes del campo magnético en las muestras tomadas al interior de las estructuras de combustión ha permitido obtener la datación arqueomagnética del último uso del horno, lo cual permite definir los procesos de uso y función de las estructuras en los sitios del área Maya (Goguitchaishvili *et al.*, 2020).

En este artículo presentamos los resultados de los análisis arqueométricos y arqueomagnéticos de un horno ubicado aproximadamente 2.5 km al noroeste en la periferia del sitio de Dzibilchaltún, que nos permite entender el uso de la cal en la región.

2. Área de investigación y contexto arqueológico

El horno estudiado se ubica en el tablaje 42161 al norte de Mérida, al noroeste del centro del sitio arqueológico de Dzibilchaltún. El complejo doméstico (Figura 1) estuvo compuesto por una plataforma rodeada de estructuras auxiliares en forma de montículos y cimientos, al norte de la plataforma se ubicó el complejo del horno y sus estructuras auxiliares (Góngora Salas *et al.*, 2020).

Este complejo fue denominado grupo 7 en las investigaciones arqueológicas en el tablaje 42161 llamado Chaactun, al sur del grupo 7 se ubicó el área nuclear del tablaje, el cual corresponde a un complejo arquitectónico de rango 3 de la periferia de Dzibilchaltún. Las excavaciones realizadas en el grupo 7 y los diferentes grupos localizados en el tablaje 42161 permitieron recuperar artefactos de concha y piedra verde, así como vasijas cerámicas provenientes de enterramientos, algunas conchas talladas pertenecen a pectorales realizados en bivalvos del pacífico. La arquitectura del área nuclear del tablaje corresponde a mampostería abovedada, de una y dos crujiás, así como cimientos absidales pertenecientes a casas, montículos de piedra pequeña correspondientes a las estructuras auxiliares y plataformas complejas con múltiples ocupaciones (Góngora Salas *et al.*, 2020). El horno para producir cal se ubicó al sur del área nuclear, la hipótesis es que la estructura de combustión y el grupo 7 eran áreas productivas asociadas y controladas por los habitantes del área nuclear.

El horno de cal corresponde al tipo anular según Ortiz Ruiz (2019), durante los trabajos de limpieza y registro se identificaron evidencias de incendios forestales en la superficie, se exploró la

estructura por medio de una retícula de control, después de retirar la capa superficial y las primeras dos capas, se registró la presencia de sedimentos de color grisáceo mezclado con sedimentos café claro-rojizo, su consistencia fue granulosa, al retirar el sedimento se ubicó un área de concreción que cubría toda la circunferencia del horno, al romper la concreción fue posible registrar que su grosor fue de 0.54 m, bajo la concreción blanca de cal se registró la presencia de sedimentos de color negro-gris oscuro y en la esquina sureste del horno un fragmento de leño carbonizado que midió 0.15-0.20 m de diámetro, al moverlo fue posible registrar que era carbón. En otras áreas del horno se localizaron fragmentos microscópicos de carbón y fue posible notar que el carbón había dejado una impresión en la concreción confirmando que el combustible se depositaba sobre el piso del horno y la roca se colocaba sobre el combustible de madera.

Al término de la exploración fue posible registrar la presencia de un canal tallado en el piso

del horno con una dirección noreste-suroeste y un desnivel en el lado oeste siendo esta sección menos profunda (Figura 2). Los muros del horno fueron realizados con piedra caliza, el cual presentaba craquelaciones y desprendimientos debido a la repetida exposición a altas temperaturas; el piso del horno fue la roca madre donde se observaron áreas de exposición al fuego por los cambios de coloración de la roca y su fragmentación por el uso constante del fuego.

La estratigrafía de la excavación identificó nueve capas que corresponden a tres niveles relacionados a la formación del contexto. Las capas I-III se relacionan al derrumbe del muro interior y la deposición de sedimentos provenientes del abandono, al final de la capa III al retirar los escombros se ubicó un cambio en la coloración y consistencia de los sedimentos. En las capas IV-VI, se ubicó la concreción de sedimentos blancos que correspondían a lo que consideramos cal, lo cual se observó de manera parcial en la capa VII, por último las capas

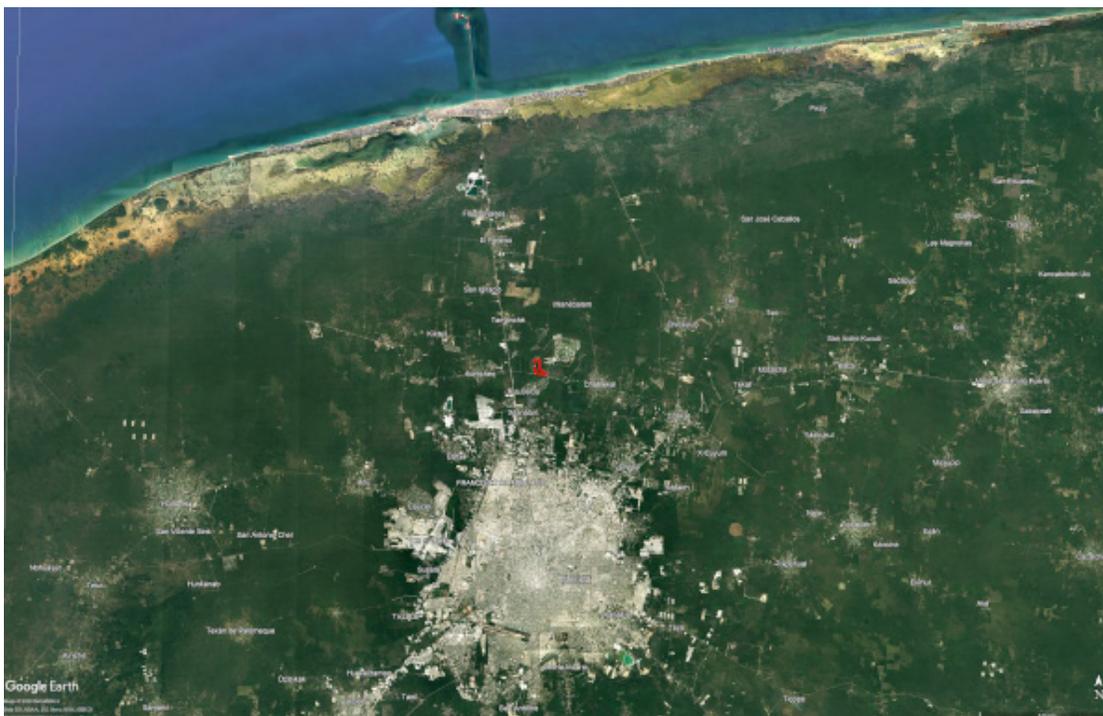


Figura 1 Ubicación del tablaje 42161 Chaactun, marcado con el polígono en color rojo, ubicado al norte de Mérida.

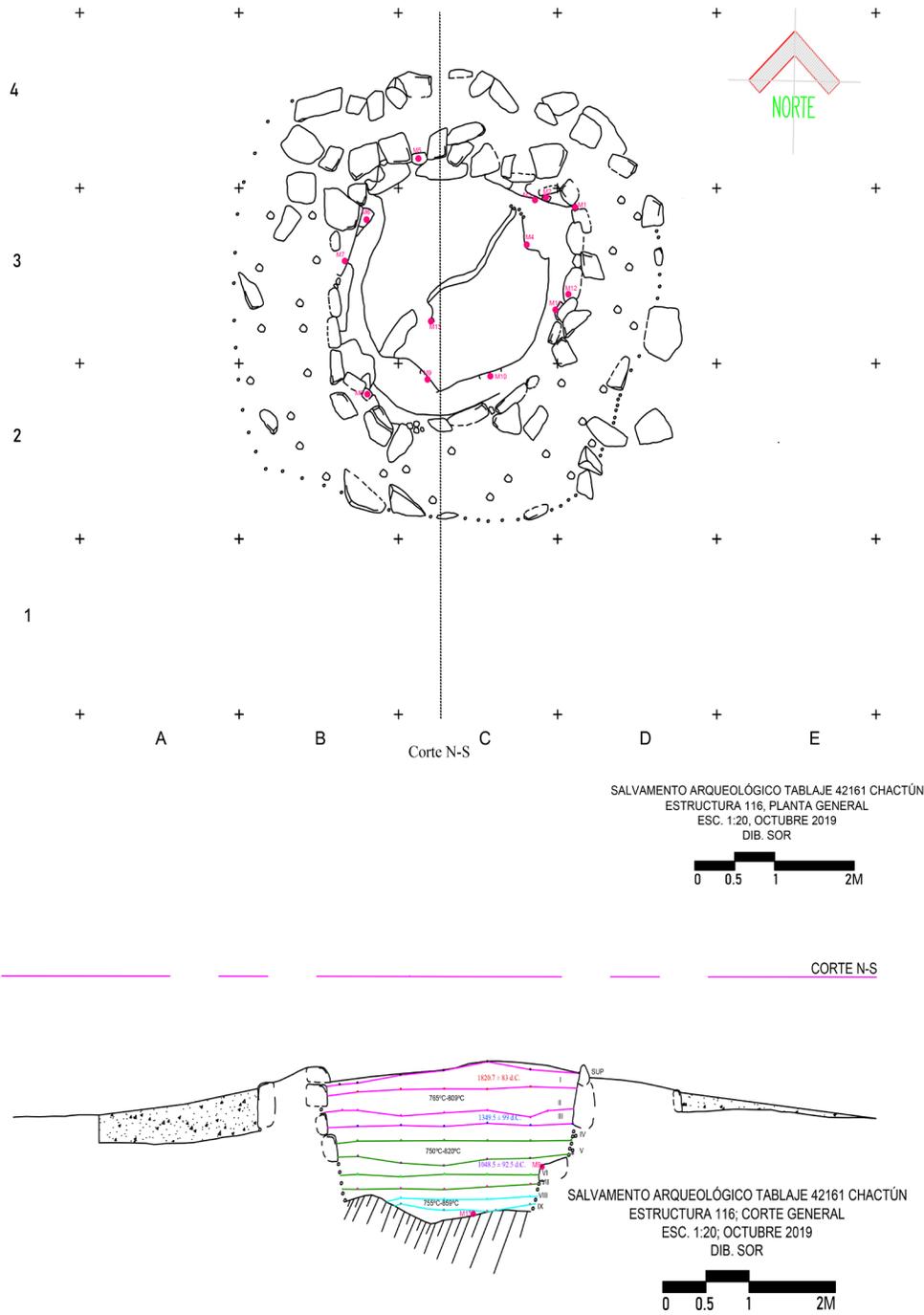


Figura 2 Horno planta y corte arquitectónico, indicando la posición de las muestras arqueomagnéticas y las dataciones obtenidas, redibujado a partir de Ortiz Ruiz, 2019 citado en Góngora Salas *et al.*, 2020.

VIII-IX, corresponden a los depósitos formados por los restos de combustible que se localizaron antes del piso (Figura 2); este último fue tallado a partir de la roca madre que presenta un desnivel.

3. Materiales y Métodos

Los trabajos de excavación recuperaron 341 muestras de sedimentos, carbón, rocas calcinadas, concreciones y 13 muestras de los muros y el piso del horno para realizar la datación arqueomagnética. Las muestras para el estudio arqueométrico se realizaron mediante la subdivisión de la retícula de control para ubicar las muestras siguiendo los procedimientos descritos en Ortiz Ruiz (2019). El muestreo arqueomagnético necesitó del uso de yeso, acrílicos de plástico, un nivel circular y una brújula Brunton, para orientar las muestras dentro del horno (Figura 3). Las muestras fueron identificadas con números arábigos y en el caso de las muestras arqueomagnéticas se utilizaron las siguientes claves las cuales indican la profundidad de las muestras CH1 a 90 cm,

CH5 a 96 cm, CH12 a 101 cm, CH2 a 113 cm, CH8 a 119 cm, CH7 a 126 cm, CH11 a 127 cm, CH6 a 145 cm, CH10 a 168 cm, CH3 a 173 cm, CH9 a 184 cm, CH13 a 210 cm, y CH4 a 229 cm.

3.1. ESTUDIO PIROTECNOLÓGICO POR EL MÉTODO FTIR-ATR

La espectrometría de infrarroja es una técnica que nos permite identificar los materiales a partir de las señales de vibración de los enlaces moleculares de los materiales y nos proporciona información sobre el tipo de polimorfo de los minerales y su orden atómico (Gueta *et al.*, 2007). La técnica se utilizó para realizar la caracterización mineral e identificar los cambios en los materiales debido a su exposición al fuego, siguiendo la propuesta de Toffolo *et al.* (2017, 2019), Regev *et al.* (2010), Ortiz Ruiz *et al.* (2023).

Los análisis fueron realizados con el módulo de Reflectancia Total Atenuada (ATR), la preparación de las muestras incluyó el molido de un fragmento de roca, concreción o sedimento proveniente de la exploración de los hornos, en un mortero y pistilo de ágata y cada polvo obtenido fue depositado en

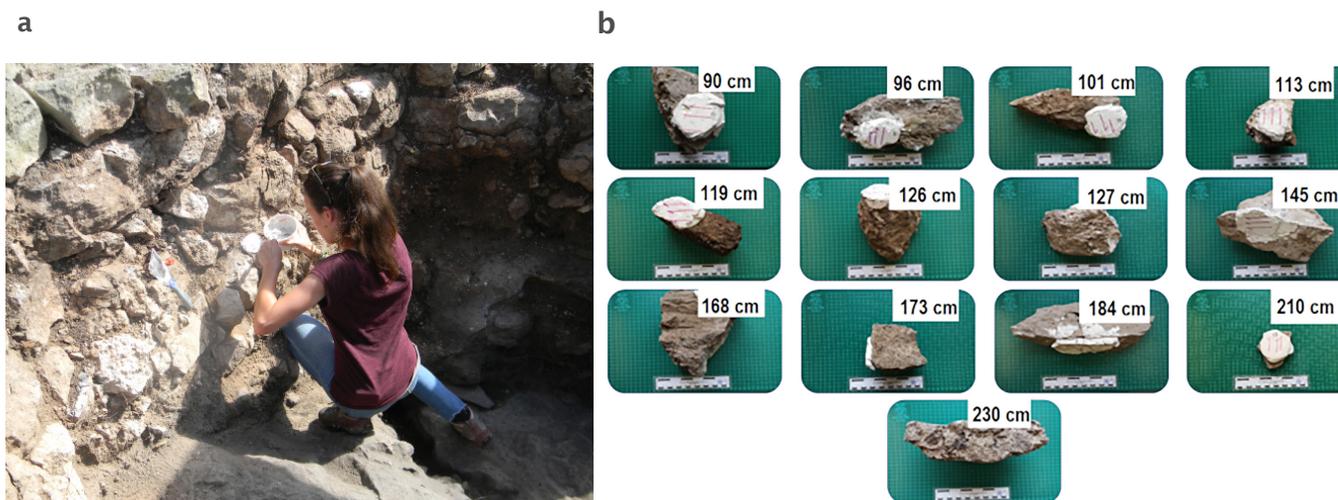


Figura 3 Toma de muestras en campo de las paredes y el piso del horno después de la excavación e imágenes de las muestras en laboratorio, en cm se indica la profundidad de la muestra.

un contenedor de plástico, en espera de su análisis. La muestra pulverizada se analizó utilizando un espectrómetro portátil Bruker Alpha Platinum en modo ATR con cristal de diamante, los espectros fueron adquiridos a una resolución de 4 cm⁻¹ y 32 scans en el intervalo de 400-4000 cm⁻¹ en números de onda. Estos análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC) del Instituto de Física de la UNAM.

La identificación mineralógica de las muestras analizadas se realizó mediante la comparación de los espectros con los materiales de referencia certificados del National Institute of Standards and Technology, SMR88b y SMR1D y las bases de datos publicadas por Chukanov (2014) y el repositorio de espectros FTIR del Kimmel Center for Archaeological Science Infrared Standards Library del Weizmann Institute of Science.

3.2. DATACIÓN ARQUEOMAGNÉTICA

Los análisis arqueomagnéticos se desarrollaron en las instalaciones del Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán de la UNAM, en el laboratorio del Servicio Arqueomagnético Nacional. Se realizó un análisis de magnetismo de rocas a los fragmentos de las 13 muestras orientadas provenientes del horno, pulverizando cada muestra dentro de un mortero de ágata de material diamagnético. Cada muestra en polvo fue sometida a un análisis de susceptibilidad vs temperatura, para posteriormente determinar las temperaturas de Curie, identificar sus portadores magnéticos y las diferentes fases que pueden tener. Dicho análisis se realizó utilizando un susceptibilímetro marca AGICO modelo MFK1.

Posteriormente de cada muestra se obtuvieron especímenes de 1cm³, teniendo entre 8 o 9 especímenes por muestra, para poder determinar las direcciones del campo magnético (declinación e inclinación) del sitio en cuestión mediante el protocolo de campos

alternos haciendo uso de un desmagnetizador LDA-5 junto con un magnetómetro de giro AGICO JR-6.

Después de su desmagnetización, se promediaron las direcciones por muestra y se compararon entre ellas para determinar si corresponden a un mismo evento. Finalmente, al tener las medias direccionales definidas se hizo uso del programa de datación arqueomagnética en MatLab (Pavón-Carrasco *et al.*, 2011) para determinar la edad del horno en cuestión con el uso de las curvas de variación paleosecular más confiables de México.

4. Resultados y discusión

El análisis de los espectros FTIR-ATR y su identificación mineralógica nos confirmó la presencia de calcita en el 99% de las muestras, asimismo, siguiendo la curva de calibración de temperaturas de calcinación para materiales calizos (Ortiz Ruiz *et al.*, 2023) logramos identificar las temperaturas de quemado en los sedimentos recuperados al interior del horno, así como en las piedras colapsadas al interior, datos secuenciados estratigráficamente durante las excavaciones.

La evidencia de fuego natural causado por incendios forestales y agrícolas se corroboró en el caso de las muestras de la superficie las cuales alcanzaron temperaturas entre los 760°C-805°C. Previo a los análisis se había registrado la presencia de carbón y troncos a medio calcinar en la superficie, que formaban parte de los incendios recientes en el área, los resultados del análisis de los sedimentos superficiales nos confirmaron la presencia de fuego moderno en el contexto.

El análisis por FTIR-ATR de las muestras provenientes de la excavación nos indican que en las capas I-III las temperaturas entre los 765°C-809°C estas capas corresponden al derrumbe del muro interior y la deposición de sedimentos sobre la concreción encontrada al final de la capa III. La concreción formada por las capas IV, V, VI y parcialmente la VII presentan temperaturas entre

los 750°C-820°C por último las capas VIII y IX corresponden a los depósitos formados por los restos de combustible antes del piso y tuvieron temperaturas entre los 755°C-859°C con dos muestras que presentan temperaturas bajas localizados en la parte central del horno dentro del canal localizado en la estructura.

El piso del horno, aunque presenta un desnivel natural siguiendo la formación de la roca madre, su exposición al fuego indica la presencia de alta temperatura. Las muestras analizadas del piso indican una exposición entre los 752°C-790°C. En las paredes del horno se recuperó pequeñas concreciones de cal adheridas a las piedras midiendo entre 760°C-770°C; finalmente las piedras que formaron las paredes del horno alcanzaron temperaturas entre los 750°C-780°C con algunos puntos de baja temperatura o geogénicos entre los 0°C-580°C distribuidos en todas las secciones superiores e inferiores del horno (Figura 4).

El horno, en los sedimentos recuperados, presenta temperaturas altas de calentamiento a excepción de tres muestras, la primera localizada en la capa de superficie y dos en la capa VIII que exhiben temperaturas bajas de calentamiento.

Esto contrasta con la información previamente reportada en Ortiz Ruiz *et al.* (2023) donde la distribución de bajas temperaturas era mayor al interior del horno. Sin embargo, en el caso del tablaje 42161 Chaactun es el primer horno donde logramos establecer la división entre el combustible y la cal, al ser marcada por la concreción lo cual permite diferenciar entre las bajas y altas temperaturas dentro de estas dos zonas. La diferenciación de temperaturas establece que el horno alcanzó al menos 859°C en el área del combustible y 850°C en el área de la concreción, temperaturas que son consistentes con las temperaturas alcanzadas en el proceso de calcinación y obtención de cal en Mesoamérica y el área Maya.

En cuanto a la distribución de las temperaturas en las paredes del horno la presencia de altas y bajas temperaturas es consistente con la quema y calcinación de roca donde no se logra una exposición homogénea en los muros, previamente Morales *et al.* (2011) han reportado estas variaciones para el caso de los hornos de cerámica. Sin embargo, el piso sí muestra una exposición a altas temperaturas consistente con su exposición directa al combustible utilizado en la elaboración de la cal.

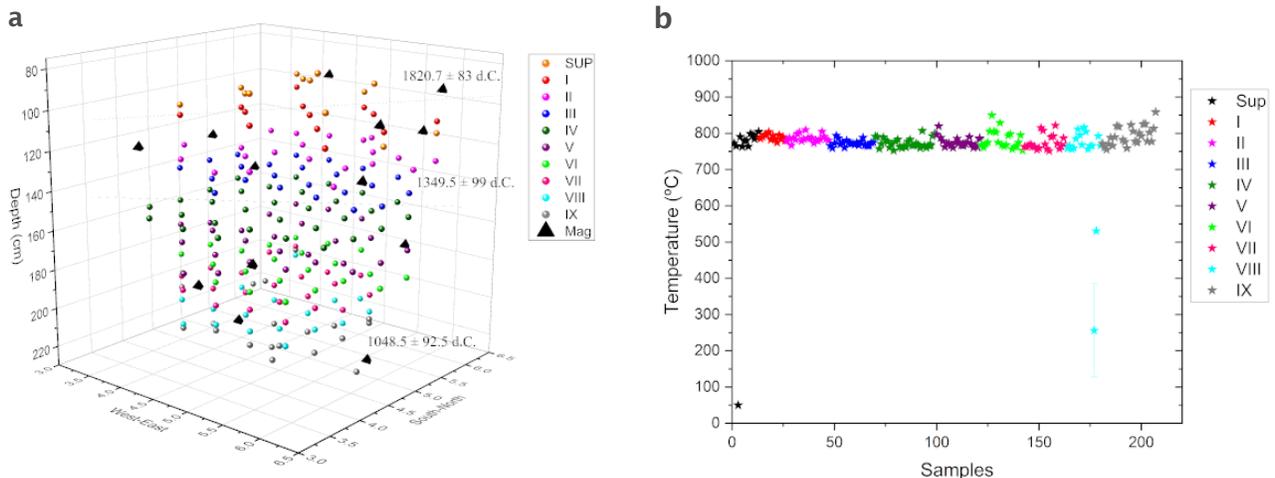


Figura 4 A) Gráfica en 3D de los puntos de muestreo siguiendo la retícula de excavación identificando las capas estratigráficas y la posición de las muestras y fechas arqueomagnéticas. B) Gráfica donde se presentan las temperaturas de calcinación, siguiendo la curva de calibración, por las muestras analizadas por FTIR-ATR de acuerdo con su posición estratigráfica con respecto a la excavación arqueológica.

Los resultados de las curvas de susceptibilidad vs temperatura (Figura 5) mostraron temperaturas de Curie entre los 524°C y los 560°C lo que habla de la presencia de titanomagnetitas con bajos contenidos de titanio. Algunas de las muestras tienen más de una temperatura de Curie (CH_9, CH_10 y CH_11), la mayoría de ellas presentan un comportamiento irreversible entre el calentamiento y el enfriamiento principalmente las que corresponden a la zona alta y media del horno en cuestión. Las muestras de la zona más profunda, es decir, el piso del horno tiene un comportamiento razonablemente reversible.

Posteriormente, las muestras se desmagnetizaron y se lograron obtener 62 direcciones correspondientes a las 11 muestras estudiadas, donde es posible observar que las direcciones de cada muestra difieren con respecto a la profundidad (Figura 6), lo que es significativo y curioso al mismo tiempo ya que el horno debería registrar, en teoría, un solo evento. Dos muestras se descartaron del análisis que son las CH3 y

CH4, por no mostrar una buena agrupación. Las direcciones medias para CH1 y CH5 tienen un número bajo de especímenes con $n=3$ y $n=1$, pero coinciden. Las direcciones de CH12 y CH2 tienen razonablemente un mayor número de especímenes con un $a95 < 4.5^\circ$, $k > 220$, de igual manera parecen la misma dirección media. Las direcciones medias de las muestras CH8, 7 y 11, aparentemente coinciden, pero el número de especímenes es bajo para CH8 y CH7 cuenta con únicamente dos especímenes. En cambio CH11 tiene un número mayor de especímenes y un $a95 < 5^\circ$. Las direcciones medias del fondo del horno corresponden a las muestras CH6, 10, 9 y 13, donde sus direcciones coinciden de muy buena manera, y parecen ser las direcciones mejor agrupadas con $n > 5$, $a95 < 3^\circ$ y $k > 270$ (Tabla 1).

Las diferencias direccionales se compararon con las temperaturas encontradas por el método de FTIR-ATR, por profundidad, donde los casos de mayor relevancia son en las profundidades donde las temperaturas que se encontraron

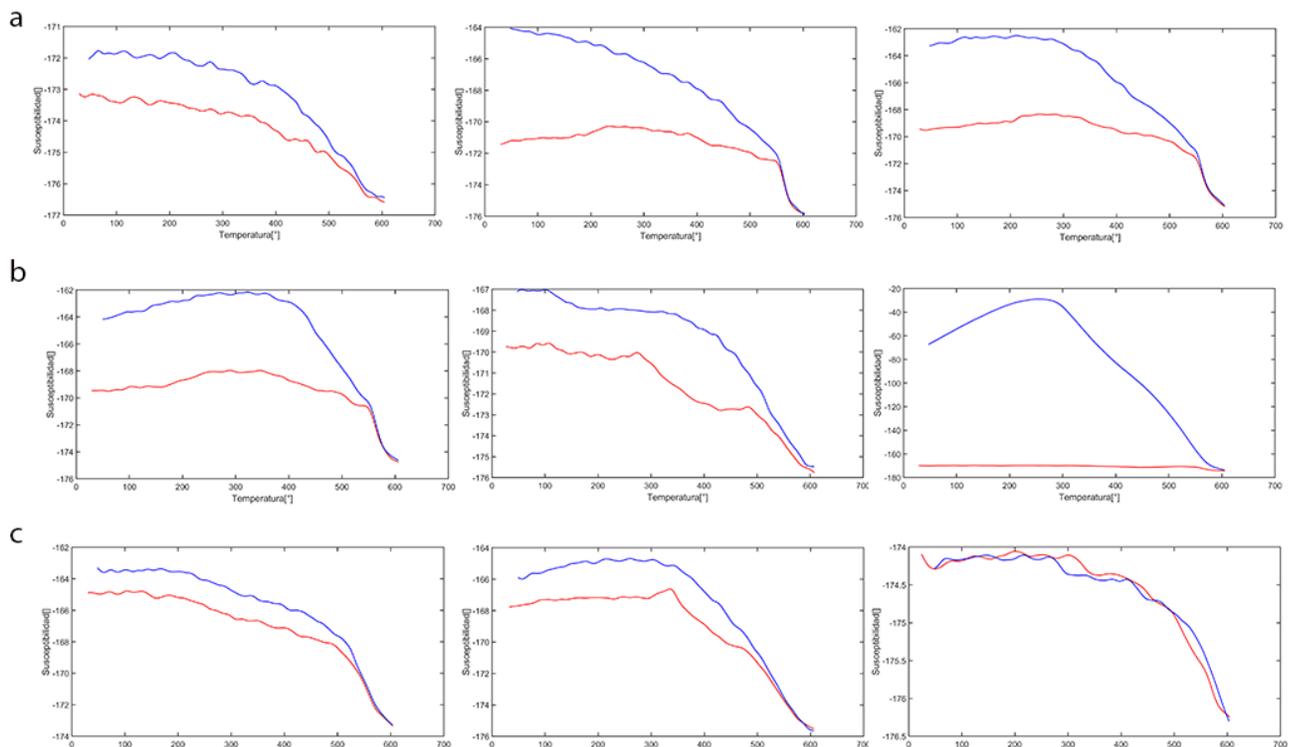


Figura 5 Curvas de susceptibilidad contra temperatura. a) Nivel superior con muestras entre los 90 cm a los 101 cm, b) Niveles intermedios 103 a 120 cm y c) Nivel inferior hasta los 230 cm.

Tabla 1. Direcciones medias arqueomagnéticas

ID	N	Dec(°)	Inc(°)	A95(°)	K	R	Profundidad [cm]	Cal(°)	Enf(°)
CH1	3	13.61	45.46	2.96	612.61	2.99	90	560	560
CH5	1	13.3	36.3	5.6	0	0.9	96	564	559
CH12	5	-4.5	38.1	4.16	226.8	4.98	101	464, 556	449
CH2	4	-5.66	34.18	3.11	505.65	3.99	113	520	516
CH8	2	-17.58	17.26	4.31	526.54	1.9	119	557	558
CH7	2	-3.39	12.25	8.29	142.63	1.99	126	562	302, 531
CH11	5	-18.87	23.67	4.48	194	4.97	127	350, 557	431
CH6	7	-25.6	33.79	2.5	437	6.98	145	524	528
CH10	9	-19.39	31.21	2.79	279.72	8.97	168	560	529
CH3				Na			173	Na	
CH9	5	-21.82	34.16	2.73	526.25	4.99	184	346, 515	537
CH13	5	-20	27.1	2.58	588.47	4.99	210	530	
CH4				Na			229	Na	

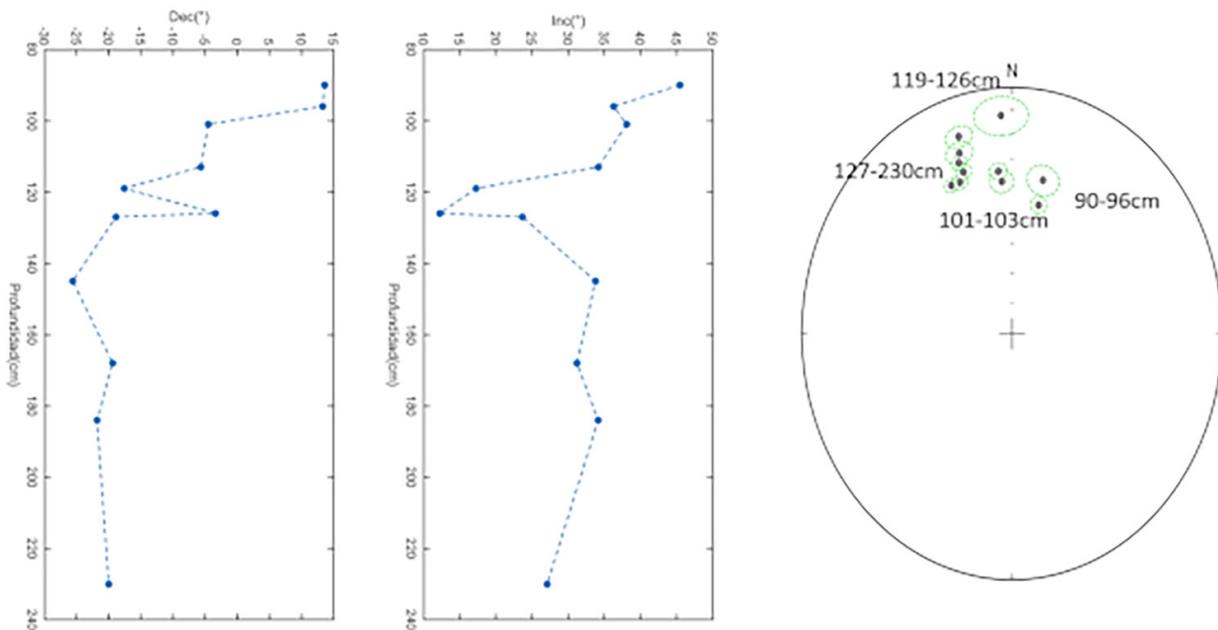


Figura 6 Variación de las direcciones medias de las muestras estudiadas con respecto a la profundidad y el estereograma de cada dirección media por muestra.

son anómalas con respecto al resto. Los análisis FTIR-ATR indicaron que el horno alcanzó de manera uniforme temperaturas altas mayores a los 750°C, sólo en muestras al inicio y a ~206 cm, es donde las temperaturas encontradas en ciertas muestras analizadas son menores a los 550°C. Las direcciones de las muestras CH6 y CH10, son las que están cercanas a dicha profundidad, pero sus direcciones medias están bien agrupadas con 7 y 9 especímenes (respectivamente), y un $a_{95} < 3^\circ$, con $k > 250$. Se puede especular que las diferencias entre las direcciones medias de cada muestra son un indicador de que el horno se utilizó en diversos momentos, teniendo claro que el piso, que corresponde a la roca madre es, probablemente, el registro más antiguo y que posiblemente quedó sepultado, donde el horno reutilizó más adelante. Es posible que las muestras superiores se vieran afectadas por una quema natural como lo es la quema forestal mediana intensidad.

Debido a la diferencia entre las medias direccionales, se realizó un análisis por grupos o cluster, tomando en cuenta las distancias entre vecinos cercanos, donde los parámetros para diferenciar las medias con su profundidad, junto a la declinación e inclinación obtenidas utilizando los especímenes de cada grupo. Este análisis arroja la existencia de cuatro grupos direccionales. El grupo I consiste en las direcciones por espécimen de CH1 y 5, el grupo II consiste en las direcciones de los cinco especímenes de las muestras CH12 y 2. El grupo III consiste en las direcciones de las muestras CH8, 7 y 11 y el grupo IV consiste en las muestras CH6, 10, 9 y 13. Para cada grupo se sumaron los especímenes y se recalcularon las medias por grupos donde se observa que la mayoría de las $a_{95} < 3^\circ$, solo el grupo uno que es el que está a una profundidad alrededor de los 90 cm tiene un $a_{95} = 6.23^\circ$, con un $k = 218.76$, que nos indica una aceptable agrupación (Apéndice I).

Utilizando las medias direccionales obtenidas por grupos se obtuvieron las diferencias angulares entre las medias, para denotar que tan diferentes son entre ellas. Resultando en una mínima diferencia angular entre los grupos III y IV, con

Tabla 2. Diferencia angular entre las medias direccionales obtenidas.

	G1	G2	G3	G4
G1	0	17.2167464	34.0771503	31.4035742
G2	17.2167464	0	16.9343431	15.336032
G3	34.0771503	16.9343431	0	10.3944649
G4	31.4035742	15.336032	10.3944649	0

un valor de 10° y la mayor diferencia es superior a los 30° entre los grupos III y IV con respecto al grupo I, lo que indica que probablemente corresponden a diferentes eventos de calcinación (Tabla 2).

Basado en los resultados obtenidos se llevó a cabo la datación arqueomagnética utilizando la herramienta de datación desarrollada por Pavón-Carrasco *et al.* (2011) para determinar las edades de las direcciones obtenidas por grupos, haciendo uso de los modelos SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014), Shawqk (Campuzano *et al.*, 2019), así como las CVPS direccional de Mahgoub *et al.* (2018) y la CVPS de García-Ruiz *et al.* (2022). Las dataciones arqueomagnéticas entre las diferentes CVPS presentaron resultados muy similares para el primer grupo de cuatro especímenes con edades alrededor de los 1800 d.C. Para el grupo II con 7 especímenes se obtuvieron dos edades, la primera datación alrededor de 1300 d.C. y otra inferior a los 548 d.C., siendo esta edad descartada por el rango temporal que ofrece. El tercer grupo con cinco especímenes muestra una edad similar entre los 960 y 1000 d.C., que junto con el grupo cuatro para 22 especímenes que tienen una edad entre los 956 y 1139 d.C. parecen coincidir entre ambos grupos.

Debido a que cada grupo tiene cuatro dataciones, se emplea el método de bootstrap para promediar las edades y evitar edades anómalas al remuestrear $n=500$, la edad obtenida y su dispersión. Lo que proporciona una edad 1820.7 ± 83 d.C., para el grupo 1. En el grupo 2 su edad final es de 1349.5 ± 99 d.C. El grupo 3 su edad es de 1001.4 ± 61.1 d.C. El Grupo 4 su edad es de 1048.5 ± 92.5 d. C.

Al observar las edades remuestreadas, es evidente que las edades del grupo 3 y el grupo 4 son muy similares, por lo cual se consideran como un mismo evento y se toma la edad del grupo 4 como la edad de la última quema de cal por artesanos del área maya, las muestras de los grupos 3 y 4 provienen de las piedras del muro y del piso del horno, las cuales corresponden a las capas estratigráficas IV-IX, donde se ubicó la sección de concreción de cal y combustible. La edad del grupo 2 (1349.5 ± 99 d.C.) corresponde al proceso de abandono o uso durante el Posclásico cuando la población alrededor de la periferia de Dzibilchaltún está activa y realizando actividades domésticas y rituales en las estructuras, los vestigios arqueológicos ubicados dentro del tablaje 42161 Chaactun nos indican una actividad desde la época prehispánica hasta alrededor de 1990. La edad del grupo 1 (1820.7 ± 83 d.C.) se asocia a la vida del rancho localizado en el lado este del tablaje y a las actividades agrícolas ligadas a las siembra y mantenimiento del rancho, este evento de índole forestal se registra en la superficie del horno, espacio donde fueron recolectadas las muestras para la datación.

5. Consideraciones finales

La producción de cal en Mesoamérica y sobre todo en el área Maya es una actividad que perduró a lo largo de los siglos. Se utilizaron dos métodos de manufactura, uno el denominado método tradicional que consistió en el uso de las llamadas caleras o piras construidas sobre la superficie del terreno y en áreas cercanas a donde se utilizaba el material. El segundo método identificado recientemente, es el del uso de hornos excavados en el terreno para hacerlos subterráneos o semi subterráneos. Previamente, se han realizado excavaciones sistemáticas de distintos hornos a lo largo de la península de Yucatán (Ortiz Ruiz, 2014, 2019; Ortiz Ruiz *et al.* 2021, 2023; Seligson *et al.*, 2017, 2017a, 2019); sin embargo, el horno localizado en el tablaje 42161 Chaactun es el primero muestreado de manera sistemática para

realizar la datación arqueomagnética; en muestreos anteriores los hornos tenían en promedio 4 muestras y en el caso de Chaactun se contaron con 13 muestras tomadas in situ en campo para realizar el fechamiento.

Los resultados del análisis por FTIR-ATR permitió identificar la presencia del área de combustible, comprobando la hipótesis propuesta (Ortiz Ruiz *et al.*, 2023) donde se sugiere que la ignición del horno se ubica en el centro y sobre el piso y que el acomodo del material tanto de la materia prima como el combustible se da construyendo una pira al interior del horno, este último aspecto Seligson *et al.* (2017) lo comprobó experimentalmente en la quema de cal dentro de un horno construido en el sitio de Kiucic.

El poder datar el proceso de abandono y colapso del horno con una fecha de 300 años de diferencia nos proporciona la hipótesis de una quema posterior o evento de exposición al fuego del contexto; al tener el horno la presencia de cal en su interior es posible que el evento de uso de fuego sea relacionado a un incendio natural o proceso de abandono de la estructura. La cal al interior de un horno nos indica que los artesanos que manufacturaron la cal ya no la requirieron y la dejaron como un contexto sellado para el futuro. Quinientos años después del abandono, el horno registra un evento en la época histórica en pleno momento de independencia nacional, que está ligado a las actividades del rancho que se ubicó en la sección este del terreno ya sea con la limpieza de áreas para pastoreo o a los procesos agrícolas de roza tumba y quema.

El muestreo sistemático para arqueomagnetismo, permitió corroborar los datos provenientes de las excavaciones que nos indicaron tres momentos de uso/ocupación de la estructura, reforzados por los resultados del análisis pirotecnológico del horno por medio de la espectrometría de infrarrojo. Al final, la ocupación del tablaje 42161 Chaactun ubicado en la periferia de Dzibilchaltún es corroborada por los métodos sistemáticos de análisis en conjunto con los datos arqueológicos; en la actualidad podemos ver la reocupación de

un territorio que lleva siendo habitado desde el Preclásico medio (~700 a.C.) a la actualidad y los eventos del fuego naturales y culturales están en continuo movimiento en la región.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Ortiz-Ruiz, S., de Lucio, O.G., Goguitchaichvili, A., García-Ruiz, R.; Análisis o adquisición de datos: Ortiz-Ruiz, S., de Lucio, O.G., Goguitchaichvili, A., García-Ruiz, R.; Desarrollo metodológico/ técnico: Ortiz-Ruiz, S., de Lucio, O.G., Goguitchaichvili, A., García-Ruiz, R., Morales-Contreras, J.J., Murguía Salazar, J.A.; Redacción del manuscrito original: García-Ruiz, R., Ortiz-Ruiz, S.; Redacción del manuscrito corregido y editado: Ortiz-Ruiz, S.; Diseño gráfico: Ortiz-Ruiz, S., García-Ruiz, R.; Trabajo de Campo: Góngora Salas, Á., Ortiz-Ruiz, S., de Lucio, O.G., Vernet Tarragó, E.; Interpretación: Ortiz-Ruiz, S., de Lucio, O.G., Goguitchaichvili, A., García-Ruiz, R.; Financiamiento: Góngora Salas, Á., Ortiz-Ruiz, S., de Lucio, O.G., Bautista-Zuñiga, F., Goguitchaichvili, A.; Dirección del proyecto: Góngora Salas, Á., Ortiz-Ruiz, S., de Lucio, O.G., Goguitchaichvili, A.

Financiamiento

El trabajo de campo fue cubierto por el Salvamento Arqueológico Tablaje 42161 Chaactún del Centro INAH-Yucatán del Instituto de Antropología e Historia y por el proyecto CONAHCYT CF 2019 No. 731762; el trabajo de laboratorio fue posible gracias a los proyectos CONAHCYT LN293904, LN 299076, LN314846, LN315853 y CF731762 y al proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN100224.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC-IF), y al

Servicio Arqueomagnético Nacional el uso de las instalaciones. Al Instituto Nacional de Antropología e Historia los permisos para la toma y análisis de las muestras. S. Ortiz agradece al CONAHCyT el apoyo recibido durante la Estancia Posdoctoral.

Conflicto de intereses

Los autores hacen constar que no existen conflictos de interés con otros autores, instituciones u otros terceros sobre el contenido (total o parcial) del artículo.

Editor a cargo

José Luis Ruvalcaba Sil.

Referencias

- Barba-Pingarrón, L.A., 2013, El uso de la cal en el mundo prehispánico mesoamericano, en Barba Pingarron, L.A., Villaseñor Alonso, I. (eds.), *La Cal: Historia, propiedades y usos: Ciudad de México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas, 19-46.
- Campuzano, S.A., Gómez-Paccard, M., Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., 2019, Emergence and evolution of the south Atlantic Anomaly revealed by the new paleomagnetic reconstruction SHAWQ2k: *Earth and Planetary Science Letters*, 512, 17-26, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.01.050>
- Chukanov, N.V., 2014, *Infrared Spectra of Mineral Species. Extended library*: New York, Springer, IX, 1726 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7128-4>
- Fauvet-Berthelot, M.F., 1986, *Ethnopréhistoire de la Maison Maya (Guatemala 1250-1525): Guatemala, Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (CEMCA)*, 300 p. <https://doi.org/10.4000/books.cemca.3634>

- García-Ruiz, R., Goguitchaishvili, A., Pavón-Carrasco, A., Soler, A. M., Pérez-Rodríguez, N., Osete, M.L., Morales, J., Kravchinsky, V., 2022, Fluctuations of magnetic inclination and declination in Mexico during the last three millennia: Quaternary Geochronology, 71, 101309. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101309>
- Goguitchaishvili, A., Ortiz-Ruiz, S., Morales, J., Kravchinsky, V., de Lucio, O., Cejudo, R., García, R., González, E., Ruvalcaba, J.L., Pingarrón, L.B., 2020, Pyrotechnological knowledge in the pre-Hispanic Maya society: Magnetic and infrared spectrometry surveys of limekilns in the western Yucatan Peninsula (Mexico): Journal of Archaeological Science: Reports, 33, 102457. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102457>
- Góngora-Salas, A., Cepeda-Cob, M., Ortiz-Ruiz, S.M., 2020, Informe del Salvamento Arqueológico tablaje 42161 Chactún. Mérida, Yucatán, México: Centro INAH-Yucatán, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Informe técnico, 304 p.
- Gueta, R., Natan, A., Addadi, L., Weiner, S., Refson, K., Kronik, L., 2007, Local atomic order and infrared spectra of Biogenic Calcite: Angewandte Chemie International Edition, 46(1-2), 291-294. <https://doi.org/10.1002/anie.200603327>
- Guillot, C., 2014, The Use of Pozzolanic Materials in Maya Mortars: New Evidence from Rio Bec (Campeche, Mexico): Journal of Archaeological Science, 47, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.03.037>
- Hansen, E.F., 2000, Ancient maya burnt-lime technology: cultural implications of technological Styles: Los Angeles, U.S.A., University of California, tesis doctoral, 870 p.
- Hueda-Tanabe, Y., Soler-Arrechalde A.M., Urrutia-Fucugauchi J., Barba L., Manzanilla, L., Rebolledo-Vieyra M., Goguitchaichvili, A., 2004, Archaeomagnetic Studies in Central Mexico Dating of Mesoamerican Lime-Plasters: Physics of the Earth and Planetary Interiors, 147, 269-283. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.06.006>
- Mahgoub, A.N., Reyes-Guzman, N., Böhnell, H., Siebe, C. Pereira, G. Dorison, A., 2018, Paleomagnetic constraints on the ages of the Holocene Malpaís de Zacapu lava flow eruptions, Michoacán (México): Implications for archeology and volcanic hazards: The Holocene, 28(2), 229-245. <https://doi.org/10.1177/0959683617721323>
- Morales, J., Goguitchaichvili, A., Pineda-Durán, M., Aguilar-Reyes, B., Camps, P., Carvallo, C., Calvo-Rathert, M., 2011, Are ceramics and bricks reliable absolute geomagnetic intensity carriers?: Physics of the Earth and Planetary Interiors, 187(3-4), 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.06.007>
- Ortiz Ruiz, M.S., 2014, Caracterización de las Estructuras Anulares de la Región del Occidente de las Tierras Bajas Mayas: Morelia, México, El Colegio de Michoacán, tesis de maestría, 139 p.
- Ortiz Ruiz, M.S., 2019, El conocimiento pirotecnológico de la Sociedad Maya prehispánica: Estudio de los hornos para cal en las Tierras Bajas Mayas del Norte: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado, 212 p.
- Ortiz Ruiz S., Goguitchaichvili A., Morales J., 2015, Sobre la edad de los hornos de cal en el área Maya: Arqueología Iberoamericana, 28, 9-15. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1312640>
- Ortiz Ruiz, S., Goguitchaichvili, A., Kravchinsky, V.A., Cejudo, R., de Lucio, O., Bautista, F., Villa, A., Góngora, A., Morales, J., Barba Pingarrón, L., 2021, Maya Limekilns as geomagnetic Field recorders: Journal of South American Earth Sciences, 109, 103284. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103284>
- Ortiz Ruiz S., de Lucio, O.G., Mitrani Viggiano, A., Pérez Castellanos, N.A., Ruvalcaba Sil, J.L., Barba Pingarrón, L., Goguitchaichvili,

- A., 2023, Mayan Fire: Calibration curve for determination of heating temperatures of limestone, lime, and related materials by FTIR measurements: *Journal of Archaeological Science: Reports*, 49, 103966. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.103966>
- Pantoja, L., Cejudo, R., Goguitchaishvili, A., Morales, J., Ortiz, S., Cervantes, M., Bautista, F., García, R., 2020, La memoria del fuego en el Yucatán Prehispánico: Intervención arqueomagnética de un horno para la producción de cal (Sitpach, Mérida): *Arqueología Iberoamericana*, 45, 22-28. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3733817>
- Pavón-Carrasco, F.J., Rodríguez-González, J., Osete, M.L., Torta, J.M. 2011, A matlab tool for archaeomagnetic dating: *Journal of Archaeological Science*, 38(2), 408-419. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.09.021>
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. De Santis, A., 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>
- Regev, L., Poduska, K.M., Addadi, L., Weiner, S., Boaretto, E., 2010, Distinguishing between calcites formed by different mechanisms using infrared spectrometry: archaeological applications: *Journal of Archaeological Science*, 37, 3022-3029. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.027>
- Seligson, K., Ortiz Ruiz, S., Barba Pingarrón, L., 2019, Prehispanic Maya burnt Lime Production: Previous Studies and Future Directions: *Ancient Mesoamerica*, 30(2), 199-219. <https://doi.org/10.1017/S0956536117000347>
- Straulino Mainou, L., 2015, Hacer mezclas de cal en Dzibanché durante el clásico temprano: la temporalidad y la función arquitectónica como determinantes: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 290 p.
- Thibodeau, M., 2013, Maya pyrotechnology and plasters: Integrating Micromorphology and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) at San Bartolo and Xultun, Guatemala: Boston, U.S.A., Boston University, tesis de licenciatura, 78 p.
- Toffolo, M.B., Ullman, M., Caracuta, V., Weiner, S., Boaretto, E., 2017, A 10,400-year-old sunken lime kiln from the Early Pre-Pottery Neolithic B at the Neshar-Ramla quarry (el-Khirbe), Israel: *Journal of Archaeological Science: Reports*, 14, 353-364. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.06.014>
- Toffolo, M.B., Regev, L., Dubernet, S., Lefrais, Y., Boaretto, E., 2019, FTIR-based crystallinity assessment of aragonite-calcite mixtures in archaeological lime binders altered by diagenesis: *Minerals*, 9(2), 121. <https://doi.org/10.3390/min9020121>

Apéndice I. Direcciones arqueomagnéticas por espécimen y con respecto a la profundidad.

Nombre	Especimen	M[A/m]	Dec	Inc	Prec/MAD	Profundidad
	99C015A	3.634519E-03	9.5	44.7	1.9	90
	99C016A	1.314130E-03	17.3	43.7	1.5	90
CH1	99C018A	1.955700E-03	13.9	48.1	1.6	90
CH5	99C059A	1.260541E-05	13.3	36.3	5.6	96
	99C092A	2.136077E-04	4.1	39.9	1.2	101
	99C093A	2.347934E-04	-4.1	34.6	2	101
	99C094A	7.543525E-04	-13.6	39	0.8	101
	99C095A	3.73E-04	8.2	46.9	2.7	101
	99C096A	1.579837E-04	-7.1	42.9	2.3	101
	99C097A	2.856934E-04	-5.6	31.2	2.4	101
	99C098A	4.569807E-04	-4.7	36.3	1.4	101
CH12	99C099A	1.98E-03	-9	21	1.3	101
	99C001A	5.959617E-04	-6.5	33.2	2	113
	99C002A	1.671949E-03	-2.3	38.7	2.7	113
	99C003A	8.459665E-04	2.3	25	6.2	113
	99C006A	2.627019E-04	-7.5	33.1	2	113
CH2	99C007A	5.562917E-04	-6.1	31.7	3	113
	99C101A	5.918159E-04	-15.4	15.9	2	119
	99C103A	1.000259E-04	-25.4	10.6	10.6	119
	99C107A	9.214841E-04	-19.8	18.6	1	119
CH8	99C108A	1.981659E-03	-28.3	19.9	1.5	119
	99C0074	5.619891E-05	-21.6	31.7	2.3	126
	99C0077	1.160000E-04	-2.7	7.5	3.1	126
	99C0078	3.505286E-04	5.3	40.1	2.1	126
	99C0080	9.430000E-05	-10	26.2	2.7	126
CH7	99C0081	6.309153E-05	-4.1	17	5.8	126
	99C082A	1.195864E-03	-24.1	29.5	3.1	127
	99C083A	1.674402E-04	-14.5	20.3	3.9	127
	99C088A	8.451106E-04	-18.8	26.4	2.9	127
	99C089A	2.22E-04	-17.2	17.4	2.2	127
CH11	99C090A	5.602596E-04	-20.2	24.6	1.8	127
	99C064A	1.8849073E-03	-25.9	33.5	1.7	145
	99C065A	4.289878E-04	-22.4	35.7	4	145
	99C066A	1.801094E-03	-24.6	30.4	1.9	145
	99C067A	7.279977E-04	-30.9	34.3	2	145
	99C068A	1.142619E-03	-27.7	27.8	1.4	145
	99C069A	1.48E-03	-12.8	38.4	2.3	145
	99C070A	1.508828E-03	-26.5	29	1.7	145
CH6	99C072A	2.229838E-04	-22.7	32.7	6.4	145
	99C037A	2.590651E-01	-26.1	29.9	3.4	168
	99C038A	3.083524E-01	-16.7	29.2	2.5	168
	99C039A	4.871837E-01	-20.6	36.1	1.2	168
	99C040A	3.005808E-01	-14.8	32	1.1	168
	99C041A	3.252537E-01	-19.5	35.5	2.7	168
	99C042A	1.466926E-01	-12.6	31.4	1	168
	99C043A	3.178902E-01	-21.5	31.2	2.6	168
	99C044A	6.088023E-02	-23.2	25.3	2.6	168
CH10	99C045A	2.103321E-01	-19.2	29.8	0.9	168
	99C118A	3.757186E-03	-23.8	32.7	2.4	184
	99C119A	1.531855E-03	-15.6	37.1	2	184
	99C120A	9.452601E-04	-23.9	32.8	1.1	184
	99C121A	3.126012E-03	-23.2	32.5	1.3	184
	99C122A	1.765388E-03	-22.3	35.5	1.2	184
	99C123A	4.287676E-02	-20.7	25.2	0.6	184
CH9	99C124A	9.919105E-05	-12.1	35.6	5.2	184
	99C028A	1.07E-02	-14.8	10.4	1.9	230
	99C030A	6.197220E-03	-19.5	23.4	2.1	230
	99C32A	9.914726E-03	-20.6	27.3	1.1	230
	99C033A	3.728922E-03	-21.9	26.2	1.4	230
	99C034A	1.097347E-02	-16.9	27.1	1.9	230
CH13	99C036A	2.763091E-03	-21.4	31.3	1.9	230