



ANÁLISIS MICROMORFOMÉTRICO DEL ESPACIO POROSO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE TIERRA

Lilit Pogosyan¹, Salvador Piña Guido², Annick Daneels³, Konstantin A. Romanenko⁴,
Konstantin N. Abrosimov⁵, Blanca Prado Pano⁶

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México lilit-tos@yandex.ru

² Escuela Nacional de Antropología e Historia, México chava.pigui@gmail.com

³ Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México annickdaneels@hotmail.com

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 119017, Moscow, Russia, ⁴lusteramisho@mail.ru, ⁵kv2@bk.ru

Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México bprado@geologia.unam.mx

Palabras clave: porosidad, micromorfometría automatizada, tepetate, adobe, tomografía computacional

Resumen

Las propiedades de los materiales constructivos dependen de la estructura, de las características del espacio poroso y de la conexión entre las partículas dentro de la matriz. La porosidad es un parámetro importante para los materiales de construcción, en el sentido de que es una característica directamente relacionada con sus cualidades físicas. Este trabajo presenta un estudio exploratorio de porosidad (densidad y forma), usando por un lado un análisis morfométrico automatizado en 2D a partir del estudio micromorfológico de láminas delgadas y un novedoso análisis 3D por tomografía, de dos tipos de materiales constructivos: una muestra de "tepetate" o suelo de horizonte geológico endurecido, de donde se pueden obtener bloques para la construcción, y una muestra de adobe arqueológico. Por sus características, estos dos tipos de materiales pueden llegar a confundirse, por lo que es útil desarrollar estrategias para permitir su correcta identificación en contextos arqueológicos. El método en 2D indica una porosidad baja en la muestra de tepetate, con poros pequeños y redondeados, mientras en el adobe tanto la densidad como la forma de los poros es más variable. Esto probablemente refleja la compactación desigual del adobe durante el proceso de manufactura. Por su parte, la regularidad del tepetate se deriva de su formación geológica, donde grandes cantidades de sedimentos arcillosos quedan depositados en un momento, y sufren una compactación relativamente homogénea según la profundidad del sedimento. En términos constructivos, los resultados sugieren que el adobe es más poroso y menos homogéneo, por lo tanto potencialmente menos sólido, mientras el tepetate tiene mayor densidad. Los resultados obtenidos sugieren que el método de análisis comparativo tiene potencial para discriminar entre materiales constructivos.

1 INTRODUCCIÓN

En la construcción con tierra se utilizan diferentes materiales geológicos como materia prima, algunos materiales como los adobes sufren intensos procesos de cambio, pero en ocasiones, la materia prima no requiere modificaciones mayores, como en caso del tepetate que es cortado en bloques directamente del banco de extracción y usado como bloque de construcción. Estos materiales pueden presentar características macroscópicas tan similares entre sí, que resulta complicado diferenciar unos de otros. Ambos son materiales de construcción son comunes tanto en la arquitectura de origen precolombino (Serra; Lazcano, 2011) como en la arquitectura vernácula moderna. No existe, en las clasificaciones oficiales de suelos modernas, el término "tepetate", esta palabra tiene su origen en la lengua náhuatl y se traduce como "la cama de pierda" (Gama et al., 2007). En México, este término

se usa para nombrar a un amplio grupo de horizontes duros, densos y/o cementados; éstos, en su mayoría se encuentran como un horizonte sub-superficial compactado, que tiene su origen en el material piroclástico de los volcanes del centro del país, donde este tipo de material se encuentra presente en un área aproximada de 30.700 km² (Zebrowski, 1992).

Por otro lado, el uso de adobes para la construcción, es una tradición constructiva con más de 6000 años en el continente americano que por su proceso de manufactura podría ser confundido con un bloque de tepetate usado con fines constructivos.

Las propiedades de los materiales constructivos dependen de la estructura, de las características del espacio poroso y de la conexión entre las partículas dentro de la matriz. La distribución y organización del espacio poroso tiene un impacto directo en la permeabilidad al agua, el aire y en la resistencia mecánica. Por lo tanto, la porosidad es un parámetro importante de descripción de un material edáfico, pero lo es también para los materiales de construcción en el sentido de que es una característica directamente relacionada con sus cualidades físicas como material constructivo.

Este trabajo presenta un estudio exploratorio de porosidad (densidad y forma), usando por un lado un análisis morfométrico automatizado en 2D, como parte del estudio micromorfológico de láminas delgadas, y un novedoso análisis 3D por tomografía, de dos tipos de materiales constructivos: una muestra de tepetate o suelo de horizonte geológico endurecido, de donde se pueden obtener bloques para la construcción, y una muestra de adobe arqueológico. Por sus características, estos dos tipos de materiales pueden llegar a confundirse, por lo que es útil desarrollar estrategias para permitir su correcta identificación en contextos arqueológicos.

Típicamente la porosidad se estudia por métodos indirectos, como la medición de densidad aparente; sin embargo, para ello es necesario triturar un poco de la muestra. El análisis micromorfológico permite hacer un análisis en 2D de los agregados y porosidad conservando sus formas, orientación y la manera en que se conectan entre sí, pero compromete las características físicas de la muestra y exige el sacrificio de una fracción de ella durante el proceso de elaboración de la lámina delgada. Por otro lado, la tomografía computacional hace posible observar de forma no invasiva una muestra y generar un modelo en 3D, manteniendo intactas las características físicas, el tamaño y forma de las piezas analizadas. Así, el uso de ambas técnicas permite estudiar más y con mayor detalle el espacio poroso de ambos materiales usados para la construcción. Al desarrollarse la técnica 3D en comparación con la 2D, se puede llegar a un método de análisis de materiales constructivos arqueológicos que sea no destructivo, un aspecto relevante en el caso de patrimonio cultural.

2 OBJETIVO

El presente estudio propone comparar las características de espacio poroso de muestras naturales de tepetate de Tlaxcala desde una perspectiva de 2D, a partir del análisis de láminas delgadas y 3D con la aplicación de tomografía comparando los resultados con los obtenidos de muestras constructivas del sitio arqueológico La Joya, Veracruz, México, sometidas a las mismas técnicas de estudio.

3 CONTEXTUALIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

3.1 Tepetate

El material geológico conocido como tepetate corresponde a un tipo de suelo de horizonte geológico, endurecido por compactación o cementación, encontrado generalmente en las regiones volcánicas mexicanas. Por su alto contenido de arcilla, el tepetate absorbe grandes cantidades de agua, tiene poca fertilidad y se endurece cuando pierde humedad. Puede encontrarse subyaciendo la superficie, o bien, aflorar en algunas zonas. Representa un gran

obstáculo para el desarrollo de las actividades agrícolas por sus características, pero tiene algunos usos en la industria de la construcción.

Hay sedimentos similares en otros países con las mismas propiedades, pero se conocen de diferente manera, cangahua en Ecuador, talpetate en Nicaragua, ñadis en Chile, entre otros. Este tipo de materiales se endurecen al perder hidratación, por lo cual resultan ser un material adecuado para la construcción. Normalmente los tepetates se encuentran en las secuencias de los paleosuelos y se asocian a los perfiles de Luvisoles, Cambisoles, Vertisoles y etc. En las clasificaciones formales se denominan como los horizontes Frágicos y Dúricos (WRB, 2015), o fragipanes e duripanes en Soil Taxonomy (Flores et al., 1991, 1996; Dubroeuq, 1992). Los expertos los han dividido en diferentes categorías (Gama et al., 2007), según el origen de su compactación. Los que están cementados se definen por el agente principal de cementación: SiO_2 , CaCO_3 , CaSO_4 , FeO_2 o diversas sales; además, existe otro grupo de tepetates, que no están cementados por ningún agente de los antes mencionados, sin embargo, siguen siendo muy duros y compactos; éstos se conocen como “tepetate tipo fragipan” (Williams, 1972). Este trabajo sólo abordará los tepetates tipo fragipan. Por su extracción en bloque y la dureza que pueden llegar a tener, los tepetates tipo fragipan, a menudo se confunden con algún tipo de roca; sin embargo, al ser sumergido en agua éste se disgrega, comportamiento que lo distingue como un material térreo.

Uno de sitios con mayor presencia de tepetates tipo fragipan en México se encuentra en el estado de Tlaxcala. En esta región, los pobladores locales desde hace siglos usan bloques de tepetate para la construcción de casas (Flores, 2007). El clima actual en esta área es de carácter sub-húmedo, la temperatura media es 13°C , la precipitación anual promedio oscila entre 600-700mm (García, 1988). La vegetación original de la zona son los bosques de encino.

La secuencia más amplia de los tepetates de este tipo fue descrita en la parte norte del estado de Tlaxcala, donde se encontraron siete capas de este material en una zona que ha sufrido la actividad agrícola, lo que provocó la formación de una barranca de unos 15 metros de profundidad (Hessmann, 1992). Los tepetates tipo fragipan, como cualquier otro fragipan, resisten el flujo vertical de agua. A distancia de 100 metros de perfil de estudio en Tlalpan se ha registrado un charco que se mantiene presente sobre la superficie de tepetate tipo fragipan durante todo el año (Sycheva et al., 2016).

Le secuencia completa incluye tres unidades (gris, parda y roja) que se diferencian sólo por el color del sedimento y la edad, cada una de estas unidades incluye varias capas de tepetates tipo fragipan y paleosuelos (Sedov et al., 2009). Se hizo una descripción detallada del perfil, analizando las capas de los tepetates tipo fragipan y los paleosuelos, obteniendo muestras inalteradas y orientadas. Para hacer el análisis comparativo con los adobes que atañe a la presente investigación, se seleccionó una muestra de tepetate parda (TP), por ser la capa más firme y por ello, la más adecuada para la construcción (figura 1).



Figura 1. Perfil de donde se extrajo la muestra de tepetate

3.2 Adobe

El sitio arqueológico La Joya se encuentra asentado sobre la planicie aluvial del río Jamapa en el municipio de Medellín de Bravo, a 14 km al sur de la actual ciudad de Veracruz, México. En la región predomina un clima tropical con precipitaciones de 1.500 mm al año (Daneels; Guerrero, 2011). El sitio desarrolló una tradición constructiva con tierra con la que se edificaron estructuras monumentales de diferentes funciones: plataformas con unidades residenciales, palacios, construcciones administrativas además de patios, plazas, juego de pelota, pirámides etc. (Daneels, 2011). La muestra seleccionada para este estudio corresponde a un adobe recuperado de un muro asociado a la etapa constructiva IIIA Superior de una estructura con funciones palaciegas de la Plataforma Este, fechada hacia 500 d.C.

Los adobes del sitio tienen una forma particular, con cantos verticales y testas inclinadas en talud, y presentan rebabas en la parte superior. En trabajos anteriores, estas características se consideraron indicativas de adobes hechos en hoyos rectangulares (Daneels, Vernucci, 2017; Daneels, Piña, 2019).

La clave del adobe es 4 (figura 1b). Las láminas delgadas fueron hechas a partir de dos cortes perpendiculares en el bloque: el primero se hizo sobre en la testa, a una distancia aproximada de 15 cm hacia el centro de la pieza (muestra 4A); el segundo, se realizó a partir del canto en dirección paralela a las testas (muestra 4B). Debido a que este bloque presenta un espesor de poco más de 12 cm y los cubreobjetos disponibles miden 5,3cm x 7,5 cm, fue necesario cortarlas en dos: parte superior y parte inferior, para disponer del perfil del adobe completo.

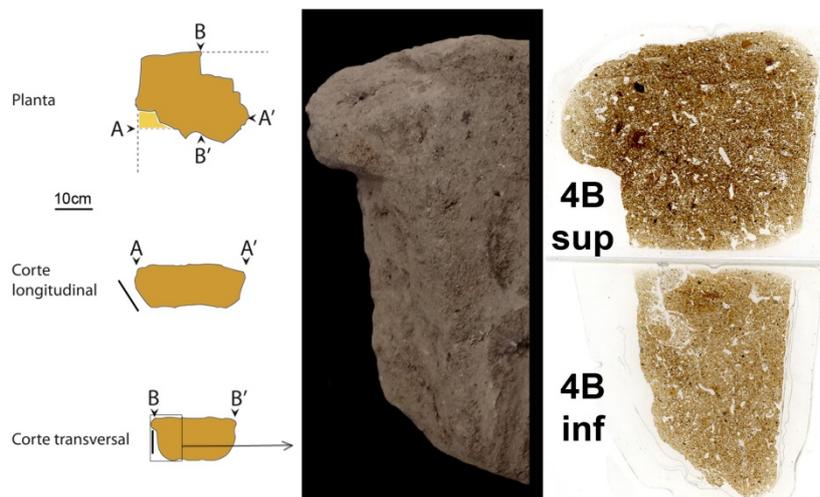


Figura 2. Adobe 4. Izquierda – dibujo del fragmento de planta (A testa, B canto), corte longitudinal y transversal; Centro – muestra cortada del canto; Derecha – láminas delgadas obtenidas

4. METODOLOGÍA

El análisis micromorfológico se realizó en las láminas delgadas de cada una de las 5 muestras (una de tepetate y cuatro del adobe). Este método permite analizar los poros mayores a 100 μm . El análisis tomográfico permite el análisis de los poros menores a 100 μm . Por el momento, solamente se pudo realizar en la muestra de tepetate (debido a que el equipo se descompuso).

4.1 El análisis morfométrico automatizado en 2D en láminas delgadas

Las láminas delgadas se impregnaron con resina poliformas PP cristal y posteriormente se desgastaron de manera mecánica y manual. Las observaciones se hicieron con ayuda de un microscopio petrográfico marca OLYMPUS modelo BX51. Éste permite observar poros con tamaño mayor a 30 μm , pero para evitar los errores relacionados con el grosor de la lámina

se descartaron los poros menores a 100 μm , ya que estos se pueden analizar con el tomógrafo.

Las láminas se escanearon a alta resolución (4800 pp) y se tomó una superficie de 30 mm x 30 mm como parámetro de área a analizar en cuatro de las muestras seleccionadas. En la muestra *4Binf* se consideró una superficie de 26 mm X 25 mm, por no alcanzar la muestra el tamaño suficiente.

Con ayuda del software ImagePro 7.0 se convirtió el escaneo a una imagen en blanco y negro, se ajustaron los contrastes para que el equipo pudiera reconocer mejor la diferencia entre poros y minerales. Para el análisis, el software se programó para contar sólo los poros con diámetro superior a 100 μm , y para medir los parámetros de área (A), diámetro mediano (D_{mean}), perímetro (P), redondez (R), largo (L) y ancho (W), recomendados por Skvotsova et al. (2017) y Prado et al. (2009). La porosidad (Z) se calcula por la ecuación 1 y la redondez (R) por la ecuación 2.

$$Z = (\sum A)/At \times 100\% \quad (1)$$

donde: Z - porosidad (%)

A - áreas de los poros (mm^2)

At - área total de toda la imagen (mm^2)

$$R = \frac{P^2}{4\pi A} \quad (2)$$

donde: R - redondez (adimensional)

P - perímetro del poro (mm)

A - área del poro (mm^2)

Este parámetro R está incluido en el programa ImagePro, pero también se conoce en otros trabajos como lo de Prado et al. (2009). El valor mínimo posible es 1, que refiere a un poro redondo perfecto; mientras más alto sea este valor, más irregular es la forma del poro. Siguiendo la clasificación propuesta por Ringrose-Voase (1996), se dividieron los poros en 3 categorías:

- i) poros tubulares, $R \leq 5$
- ii) poros fisuras, $5 < R \leq 10$
- iii) poros entre los agregados, $R > 10$

El factor de forma (F) se calcula por la ecuación 3, como la relación entre la redondez (R), largo (L) y ancho (W) de cada poro (Skvotsova et al., 2017; Karsanina et al., 2015).

$$F = \left(\frac{4\pi A}{P^2} + \frac{W}{L} \right) / 2 \quad (3)$$

donde: F - factor de forma (adimensional)

P - perímetro del poro (mm)

A - área del poro (mm^2)

L - largo del poro (mm)

W - ancho del poro (mm)

La primer parte de la ecuación se refiere otra vez a la redondez del objeto, pero aquí a la inversa de la ecuación precedente, y la segunda parte es la isometría del poro. Este parámetro define de manera más precisa la diferencia entre los poros redondos y poros alargados (Karsanina et al., 2015). Estos se dividen en 5 grupos (Skvortsova et al., 1996):

- i) Poros fisuras $F \leq 0,2$
- ii) Poros elongados $0,2 < F \leq 0,4$
- iii) Poros isométricos alargados $0,4 < F \leq 0,6$

- iv) Poros isométricos ligeramente alargados $0,6 < F \leq 0,8$
- v) Poros redondos $0,8 < F \leq 1,0$

Para poder hacer el análisis para los parámetros R y F , los datos se han dividido entre los 4 grupos de los poros, según la medida del diámetro medio (D_{mean}), en milímetros:

- i) $D_{mean} \geq 1$
- ii) $1 > D_{mean} \geq 0,5$
- iii) $0,5 > D_{mean} \geq 0,2$
- iv) $0,2 > D_{mean} \geq 0,1$

Los datos obtenidos para estos dos parámetros se están presentando en diagramas de caja y bigotes, lo que es un análisis estadístico básico (Walpole et al., 2012).

4.2 El análisis morfométrico por tomografía computacional en 3D

En tomografía computacional se separa el contenido de la muestra según la densidad del material. Cuando se procesa la imagen de la muestra, los objetos que se encuentran dentro presentan una variación de color de acuerdo a su densidad, de modo tal que los más densos tienen colores más claros (por ejemplo, los granos de cuarzo); así, los objetos menos densos se van oscureciendo con tonalidades de gris hasta que los menos densos alcanzan el negro (Bruker, 2018a). Por lo tanto, los espacios vacíos se distinguen por estar representados en color negro. El análisis tomográfico permite contar la porosidad total de la muestra, así como el porcentaje relativo de los poros conectados y cerrados (Bruker, 2018b).

La porosidad menor a $100 \mu\text{m}$ fue analizada con el micro-Tomografo Bruker SkyScan 1172 con una resolución de $6,26 \mu\text{m}$ en una muestra de tamaño aproximado de un 1 cm^3 .

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis del espacio poroso en 2D, realizado a partir de láminas delgadas (tabla 1), demuestran una diferencia importante entre la porosidad en el material natural (el tepetate) y en el material trabajado (el adobe). El parámetro Z (porosidad) tiene el menor valor en el tepetate, mientras en los adobes es casi 3 veces más grande. En las láminas que se hicieron a partir de la muestra de adobe, se nota que la parte del canto (4B) presenta una mayor porosidad que la parte de la testa (4A), y que en cada sector, la parte superior tiene un menor porcentaje de porosidad que la parte inferior; es importante señalar que la parte superior de 4A muestra una diferencia en el parámetro R (redondez) en el tercer rango de poros analizado ($0.5 > a \geq 0.2$). Tanto el porcentaje de poros como las diferencias en la redondez de la porosidad de las muestras correspondientes a la testa puede deberse a distintos grados de compactación durante el momento de manufactura: el canto, por ser más largo y tener mayor espesor entre la (superficie y el fondo del molde), será más difícil de compactar que la testa, más angosta y más delgada por su forma en ángulo (véase fig. 1b).

Tabla1. Resultados de la porosidad (Z) en lámina delgada, para adobe y tepetate

Muestra	Z (%)
adobe 4A sup	25,6
adobe 4A inf	30,6
adobe 4Bsup	45,0
adobe 4B inf	58,9
tepetate TP	23,4

La muestra del tepetate tiene buena coincidencia de los parámetros R (redondez) y F (forma) (figura 3). Como lo hemos mencionado en la metodología, los parámetros R y F son inversos: cuando la R tiene mayor valor, la F disminuye. Los dos parámetros coinciden en que los poros más redondos son los poros más finos, y los poros de forma más compleja son los poros fisuras y los que se forman entre los agregados.

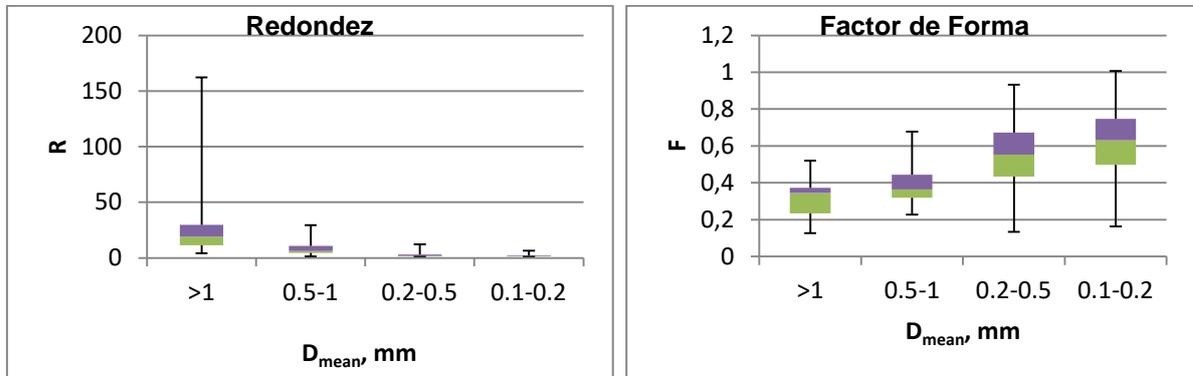
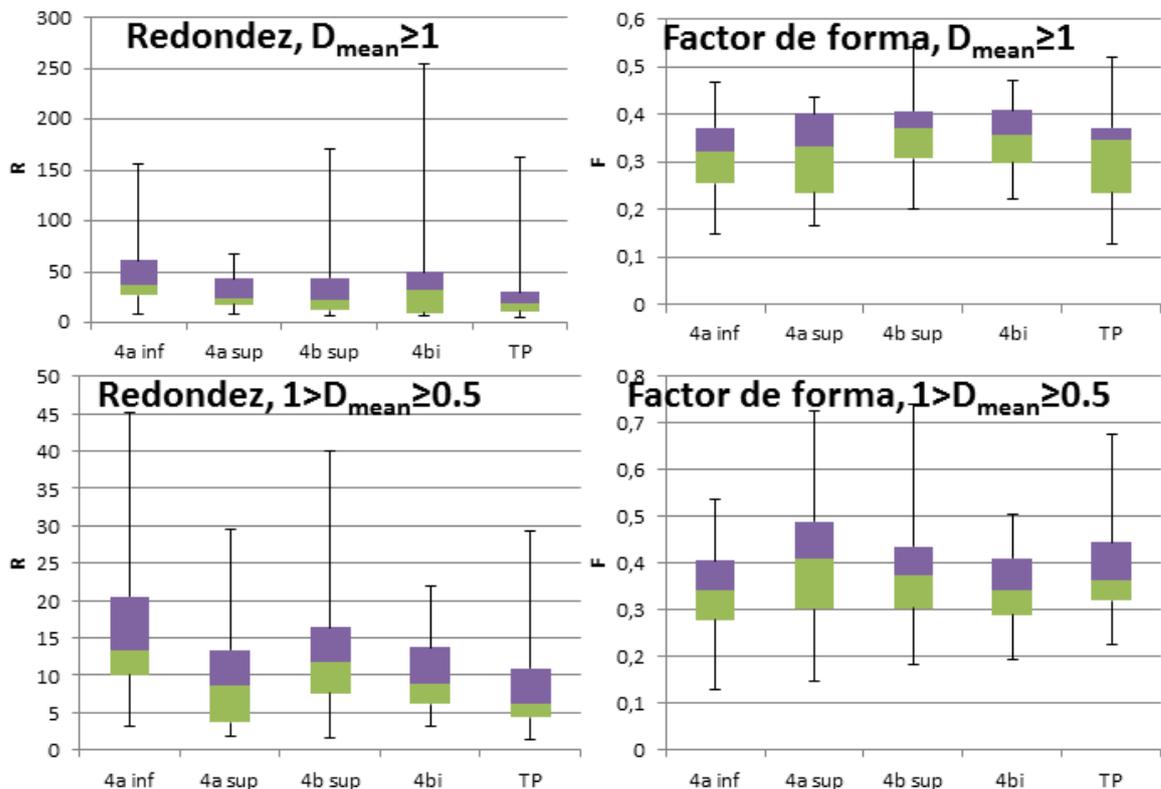


Figura 3. Gráfico de los parámetros R y F de la muestra de tepetate TP a partir de análisis de láminas delgadas

Mientras, si se dividen las 5 muestras analizadas en los grupos de tamaño de poro (figura 4), siempre la muestra del tepetate tiene valores más bajos, que quiere decir que en cualquier tamaño los poros en los tepetates naturales son más redondos, que en los adobes. De otro lado, el parámetro de forma varía mucho más y tiene la misma tendencia, pero este parámetro prácticamente coincide para todas las 5 muestras en el grupo de los poros más finos, de diámetro mediano de 0,1 a 0,2 mm. Esto significa que los tepetates intactos y los adobes no tienen una diferencia significativa en la forma de los poros de este tamaño, y que este parámetro demuestra más diferencia en los poros más grandes.



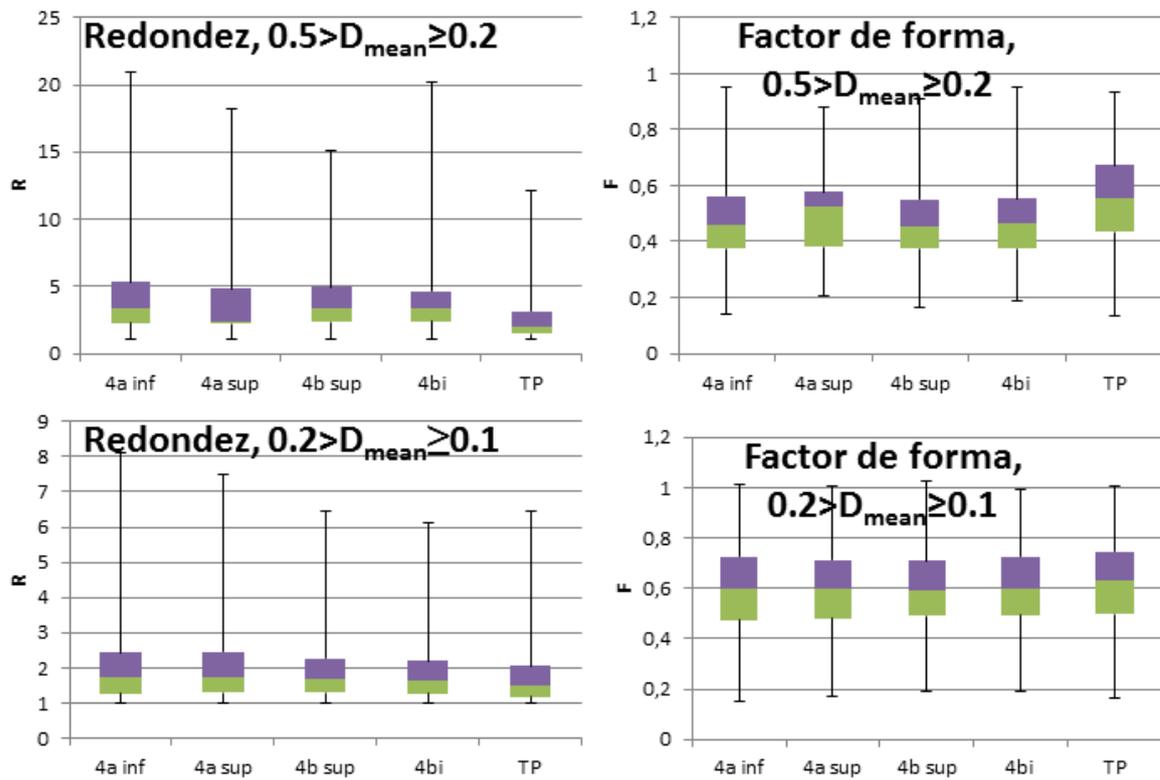


Figura 4. Comparativo de la porosidad de las 5 muestras agrupadas por 4 rangos de tamaño de poros

Analizando los poros en tomografía computacional, se ve que el porcentaje de la porosidad total (20,56%) es muy cercana al valor obtenido mediante el análisis (23,42%) en 2D (tabla 2).

Tabla 2. Análisis de porosidad de la muestra de tepetate con tomografía computacional

Tipos de poros	Porosidad (%)
Poros cerrados	3,4
Poros abiertos	17,8
Porosidad total	20,6

Al mismo tiempo, la tomografía revela que prácticamente toda porosidad de la muestra consiste en poros abiertos, o sea conectados. Esto no se puede ver con el análisis de la lámina delgada, debido a que solamente se ve una cara del corte de la muestra. En la imagen de corte realizado en el tomógrafo, se puede ver que los poros delgados están distribuidos de manera bastante homogénea en toda la muestra de tepetate (figura 5).

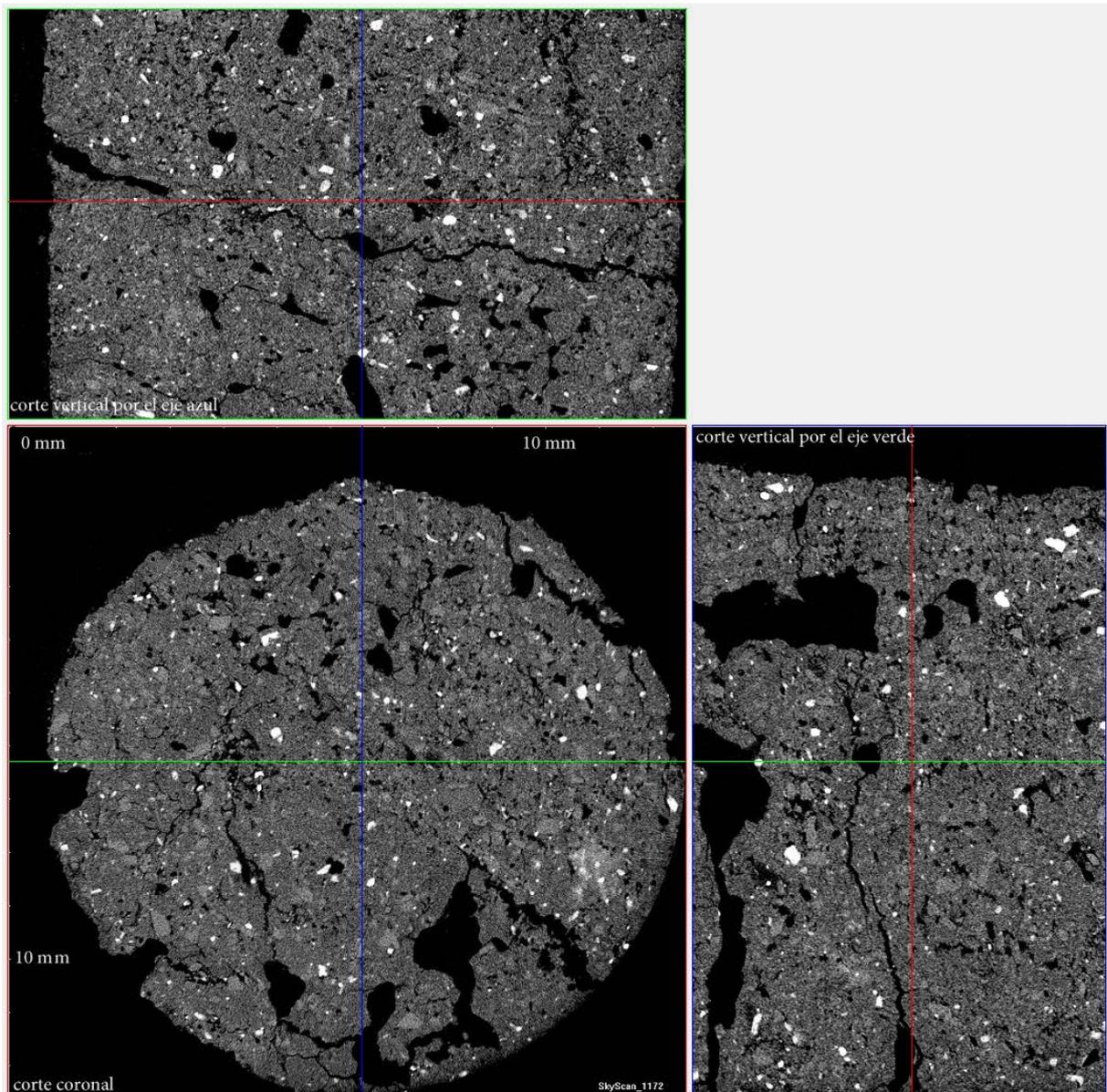


Figura 5. Imagen en 3D generada por tomografía en la cual se observa el tipo de poros en la muestra de tepetate, en corte horizontal (abajo izquierda) y vertical (arriba y abajo derecha)

6 CONSIDERACIONES FINALES

El uso de dos técnicas de análisis sobre dos materiales diferentes se complementa, abriendo nuevas posibilidades a la investigación, además, de poner en evidencia la importancia de usar técnicas de estudio no invasivas sobre los materiales arqueológicos. Este estudio exploratorio compara la porosidad en dos tipos de materiales constructivos, tepetate y adobe, por medio de la medición de forma y densidad de poros en 2D por morfometría automatizada aplicada en escaneos de láminas delgadas, y luego compara los resultados en 3D con los de tomografía obtenidos, hasta la fecha sólo para el tepetate.

El método en 2D indica una porosidad baja en la muestra de tepetate, con poros pequeños y redondeados, mientras en el adobe tanto la densidad como la forma de los poros más variable probablemente refleja la compactación desigual del adobe durante el proceso de manufactura. Por su parte, la regularidad del tepetate se deriva de su formación geológica, donde grandes cantidades de sedimentos arcillosos quedan depositados en un momento, y sufren compactación relativamente homogénea según la profundidad del sedimento. El análisis por tomografía confirma las mediciones de porosidad total derivada por el método

en 2D, pero revela que los poros son casi en el 90% del tipo conectado, algo que no se puede apreciar en 2D.

En términos constructivos, los resultados sugieren que el adobe es más poroso y menos homogéneo, por lo tanto potencialmente menos sólido. Los poros alargados grandes están presentes más en el adobe que en el tepetate, y son los que se forman con la descomposición de la paja. La presencia de esos poros alargados se puede considerar como un rasgo diagnóstico del adobe y de otros materiales procesados para construcción de tierra donde se utilizaban componentes vegetales. El tepetate, que se puede usar para la construcción una vez recortado en bloques y secado, tiene mayor densidad, anticipando una mayor resistencia; sin embargo, la presencia de poros conectados lo hará muy vulnerable a la absorción de agua, un factor adverso en la construcción.

Como indicado, se trata de un trabajo exploratorio, buscando alternativas en la evaluación la porosidad para discriminar entre tipos de materiales constructivos de tierra. Solo se trabajó con dos muestras, un adobe arqueológico y un tepetate, para ver si la línea de investigación pudiera ser fértil. Los resultados obtenidos sugieren que sí, por lo que se contempla iniciar un estudio comparativo más formal, con muestras geológicas y arqueológicas, tanto de tepetates como de adobes de la región de Tlaxcala.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bruker, (2018a). Micro-CT software support. <https://www.bruker.com/service/support-upgrades/software-downloads/micro-ct.html>

Bruker, (2018b). Micro-CT software. <https://www.bruker.com/products/microtomography/micro-ct-software.html>

Daneels, A. (2011). Arquitectura cívico-ceremonial de tierra en la Costa del Golfo: el sitio de La Joya y el urbanismo del periodo Clásico. En N. M. Robles y A.I. Rivera (eds.). Monte Albán en la encrucijada regional y disciplinaria. Memoria de la Quinta Mesa Redonda de Monte Albán. México: Instituto Nacional de Antropología e Historia. p.445-478.

Daneels, A., Guerrero Baca, L. F. (2011). Earthen architecture in the tropical low lands of México. APT Bulletin 42 (1): 11-18.

Daneels, A., Piña Guido, J.S. (2019). Adobes prehispánicos fabricados en hoyo: un caso de la costa del Golfo de México". En J. I. del Cuero Ruiz-Funes, V. M. Méndez Pineda y S. Huerta (eds.), Tercer Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción, Volumen I. Madrid: Instituto Juan de Herrera, p.267-276.

Daneels, A., Vernucci, A. (2017) Experimento de construcción con materiales, herramientas y métodos prehispánicos en México. 17º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. La Paz, Bolivia: FAADU-UMSA/PROTERRA. p.28-38

Dubroeuq, D. (1992) Los tepetates de la región de Xalapa, Veracruz (México): un endurecimiento de origen pedológico. Terra 10: 233–240.

Flores, J.A. (2007). Patrón de asentamiento e inferencia social. Una propuesta metodológica para la construcción de inferencias sociales. Escuela Nacional de Antropología e Historia, INAH, México.

Flores, R.D., González, A., Alcalá, J.R., Gama, J.E. (1991). Los tepetates. Revista de Geografía 3(4):37-41.

Flores-Román, D., González-Velázquez, A., Alcalá-Martínez, J. R., Gama-Castro, J. E. (1996). Duripans in the subtropical and temperate subhumid climate of the Trans-Mexico volcanic belt. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13, p.228–239

Gama-Castro, J.; Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., Díaz-Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. Boletín de la sociedad Geológica Mexicana, 2007; LIX, (1), 133-145

García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.

- Hessmann, R. (1992). Untersuchungen verhärteter Vulkanische Böden (Tepetate) in den Becken von Mexico und Tlaxcala (Mexico). Paris, Giessen: Bericht für die Kommission der Europäischen Gemeinschaft
- Karsanina, M.V., Gerke K. M., Skvortsova, E. B.; Mallants, D. (2015). Universal spatial correlation functions for describing and reconstructing soil microstructure. PLoS ONE 10(5): e0126515.
- Prado, B., Duwig, C., Márquez, J., Delmas, P., Morales, P., Etchevers, J.D. (2009). Image processing-based study of soil porosity and its effect on water movement through Andosol intact columns. *Agricultural Water Management* 96(10), p.1377-1386
- Ringrose-Voase, A.J. (1996). Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant Soil* 183, p. 27–47.
- Sedov S, Solleiro-Rebolledo, E., Terhorst, B., Solé, J., Flores-Delgadillo, M.L., Werner, G., Poetsch, T. (2009). The Tlaxcala basin paleosol sequence: a multiscale proxy of middle to late Quaternary environmental change in central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(2), p. 448-465.
- Serra Puche, M. C., Lazcano Arce, J. C. (2011). *Vida Cotidiana. Xochitecatl-Cacaxtla, días, años, milenios*. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas-UNAM, Vol. I
- Skvortsova, E.B., Rozhkov, V.A.; Yudina, A.V.; Vasil'eva, N.A. (2017). The diversity of the morphometric profiles of the pore space in soddy-podzolic and gray forest soils of East European Plain. *Byulleten Pochvennogo Instituta im. V.V. Dokuchaeva* 87, p.73-85.
- Sycheva, S.A.; Sedov, S.N., Pogosyan, L.A., Solleiro-Rebolledo, E. (2016). The phases of extreme and optimal development of the landscape of Central Mexico over the past 40 000 years: Geomorphological-stratigraphic study of the landscape Block Tlaxcala and the valley of Teotihuacan. - Moscow., Media-PRESS
- Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (novena edición). México: Pearson Educación.
- Williams B.J. (1972). Tepetate in the valley of Mexico. *Annals of the Association of American Geographers* 62(4), p. 618-626.
- WRB (2015). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, IUSS Working Group. World Soil Resources Reports No. 106. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Zebrowski, C. (1992). Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Terra* 10, p.15-23

AGRADECIMIENTOS

Lilit Pogosyan agradece a CONACyT por la beca de doctorado 51849333-2. El trabajo de campo en el Estado de Tlaxcala fue soportado a través del proyecto PAPIIT IN 106616 "Paleoecología, transformación biótica y desarrollo cultural durante el Pleistoceno tardío e inicio del Holoceno: un enfoque paleopedológico". Este trabajo de investigación fue realizado con el uso del equipo del Centro de Uso Colectivo del Equipo Científico "Funciones y Propiedades del Suelo y de la Cubieta Edáfica" del Instituto de Edafología Dokuchaev. Las muestras de La Joya se están analizando en el marco del proyecto CONACYT CB2015-254328, a cargo de A. Daneels, por J.S. Piña, becario del proyecto.

AUTORES

Lilit Pogosyan, estudiante de doctorado en Ciencias de la Tierra en el Instituto de Geología de la UNAM, edafóloga por la Universidad Estatal de Moscú, Rusia; realiza su investigación sobre los tepetates de Tlaxcala, México.

Salvador Piña Guido, pasante en arqueología por la Escuela Nacional de Antropología e Historia, México, colaborador en el proyecto "Exploraciones en el centro de Veracruz" (INAH) e "Identificación de una tecnología prehispánica de construcción con tierra cruda" (CONACyT), a cargo de los análisis micromorfológicos de las muestras constructivas prehispánicas.

Annick Daneels, doctora en antropología, doctora en arqueología, arqueóloga; investigadora del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM; miembro del Consejo Consultivo de la Red Iberoamericana PROTERRA; desde 2004 a cargo de la línea de investigación de Arquitectura Mesoamericana de Tierra y directora de los proyectos PAPIIT IN400816 (2016-2018) y CONACYT CB2015-254328 (2016-2019).

Konstantin A. Romanenko, investigador joven del Departamento de Física del Suelo del Instituto de Edafología Dokuchaev. Estudia el espacio poroso de los suelos a través análisis tomográfico y otros métodos.

Konstantin N. Abrosimov, maestro tecnico del Departamento de Física del Suelo del Instituto de Edafología Dokuchaev. Realiza análisis tomográfico en muestras de suelos.

Blanca Prado Pano, doctora en hidrología, DEA en hidrología, maestra en ciencias, ingeniero bioquímico, investigadora en el grupo de trabajo Suelo y Ambiente en el Instituto de Geología de la UNAM. Evalúa el movimiento del agua a través de medios porosos, especial interés tiene el análisis de la estructura y porosidad del suelo en el proceso.