

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Evaluación de materiales del centro arqueológico “El Huarco” mediante imágenes químicas de superficie 3D de orden micrométrico a gran escala

Reporte de Resultados

AUTORES

Daniela Fernanda Vargas Portugal (UTECH)

Luis Alberto Bedriñana (UTECH)

Giancarlo Marcone (UTECH)

James C. Weaver (MIT)

Admir Masic (MIT)

Lima – Perú

2025

INTRODUCCIÓN

Perú es reconocido por albergar numerosos y diversos sitios arqueológicos. En la costa peruana, estas construcciones antiguas se construyeron principalmente con unidades de mampostería de tierra (adobe) o muros de tierra (tapial). Estos materiales han mostrado heterogeneidad compositiva y complejidad estructural. Los intentos previos de caracterizar las antiguas construcciones de tierra peruanas se centraron principalmente en la macroescala (propiedades mecánicas). Sin embargo, una caracterización detallada de estos materiales antiguos es importante para comprender sus principales características mecánicas y sus procesos de degradación. Este tipo de análisis también puede ayudar a encontrar patrones que expliquen la evolución de las antiguas construcciones de tierra peruanas a lo largo del tiempo. Por lo tanto, se establecieron los siguientes objetivos para este estudio:

- Realizar una caracterización a microescala de los materiales de construcción de tierra antiguos.
- Identificar diferentes patrones de construcción a lo largo del tiempo y patrones de degradación en las muestras.

CASO DE ESTUDIO

La Zona Arqueológica Monumental El Huarco se encuentra situada en las proximidades de la costa, abrazada por los cerros Camacho, Centinela y El Fraile. Este sitio histórico está ubicado dentro del distrito de Cerro Azul, perteneciente a la provincia de Cañete y al Departamento de Lima, conformando así parte integral de la Costa Centro Sur del Perú.

Previo a la llegada de los incas a esta región, se ha registrado la presencia de un grupo social que ocupó la parte inferior del valle de Cañete durante el período intermedio tardío (1000-1400 d.C.). Este grupo, conocido como los Huarco, estaba compuesto por una élite de pescadores que gestionaba y distribuía los recursos pesqueros en la zona. La llegada de los incas significó un enfrentamiento con los Huarco locales, resultando en la eventual derrota de estos últimos y la conquista de Cañete. A partir de entonces, se produjeron importantes cambios en la región, tanto en términos sociales, políticos como económicos. Respecto a las

estructuras ya existentes en la zona, los incas se enfocaron en modificar espacios de carácter público y administrativo.

En cuanto a la arquitectura del sitio arqueológico El Huarco, los investigadores la han dividido en cuatro sectores principales, presentados en la figura 1:

- Sector Inca: Este sector, orientado hacia el mar, exhibe construcciones con características típicamente incaicas, como la utilización de mampostería de adobe y piedra labrada.
- Sector Público Central: Situado en el núcleo del asentamiento, consta de un espacio abierto rodeado por 10 estructuras de tapia dispuestas en una forma trapezoidal.
- Sector Terrazas: Este sector comprende un conjunto de terrazas artificiales diseñadas para adaptarse a la topografía del Cerro Camacho.
- Sector Periférico: Ubicado en el extremo sur del asentamiento, presenta construcciones orientadas de acuerdo a la línea costera.

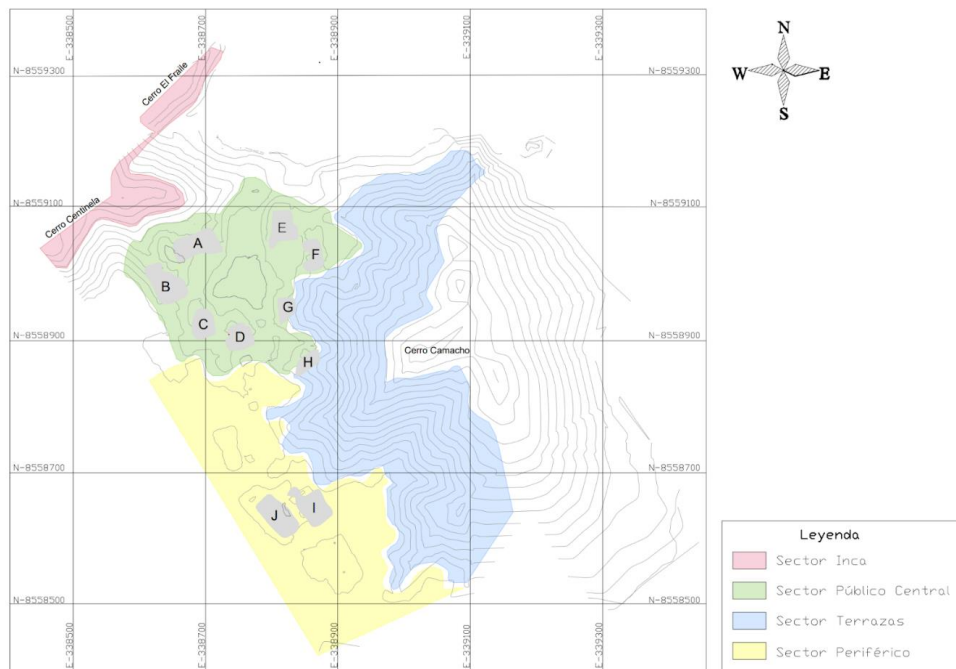


Figura 1. Sectorización de la Zona Arqueológica El Huarco

En relación a las técnicas de construcción predominantes en el lugar, se pueden identificar cuatro tipos de muros distintos. En primer lugar, se encuentran los muros de tapial simple, caracterizados por bloques que alcanzan hasta 3 metros de altura y una coloración rojiza debido a la arcilla utilizada. Otro tipo de muros incorpora hileras de adobes en cada nivel de tapial, los cuales se distinguen por su tierra de color verdoso en contraste con el tapial rojizo. Además, en el Sector Inca y como elementos divisorios en el Sector Público Central, se utilizan muros de adobe. Por último, la mampostería de roca es predominante únicamente en el Sector Inca, donde se emplea para construir muros de contención y perimetrales a lo largo de los acantilados.

Como parte de los trabajos destinados a la conservación del sitio arqueológico El Huarco, el Proyecto Qhapaq Ñan-Sede Nacional ha estado involucrado en intervenciones en el lugar desde 2013, llevando a cabo labores de preservación. Específicamente, en relación al edificio E, se tenía como objetivo contribuir a la preservación tanto de su integridad estructural como de su aspecto original, poniendo un énfasis importante en el respeto por la autenticidad de la edificación. Las actividades realizadas incluyeron reparaciones utilizando materiales que fueran compatibles con la tapia, así como la implementación de medidas preventivas para evitar un mayor deterioro.

METODOS

Se recolectaron diez muestras de cuatro edificaciones diferentes, 2 de ellas representativas de la ocupación Inca (1 y 3, Intermedio Tardío) y 2 representativas de la ocupación Huarco (E y I, Horizonte Tardío). La figura 2 muestra las ubicaciones donde las muestras de materiales fueron extraídas.

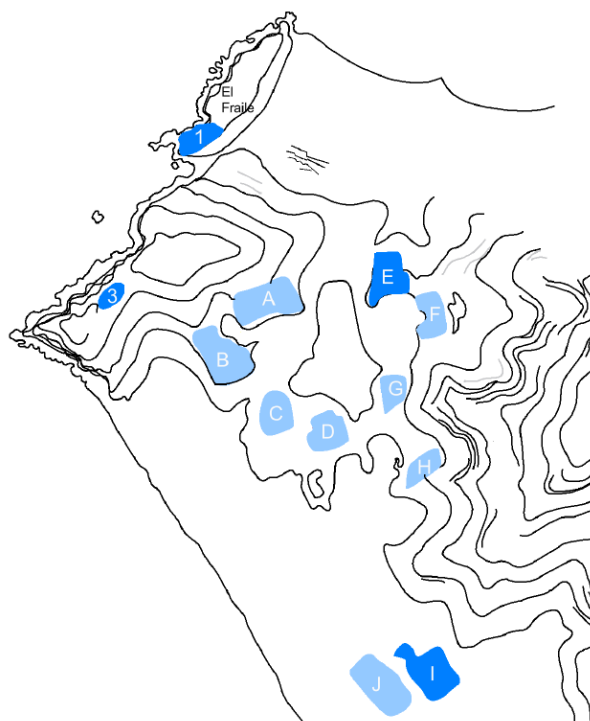


Figura 2. Ubicación de las zonas de colección de muestras de material.

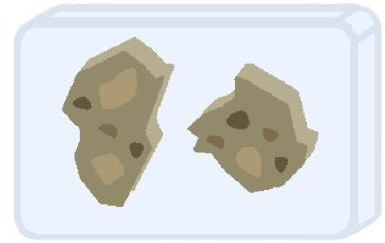
La figura 3 muestra el protocolo general para el análisis de cada una de las muestras de materiales extraídas del complejo El Huarco. Las muestras extraídas fueron debidamente cubiertas y almacenadas para preservarlas de variaciones de contenido de humedad u otras sustancias. Luego, estas muestras fueron enviadas a los laboratorios del Departamento de Ing. Civil y Ambiental del MIT, Estados Unidos, para la realización de las pruebas. Antes de la realización de las pruebas, las muestras fueron preparadas para obtener secciones transversales pulidas las cuales fueron almacenadas en parafina. La figura 4 ilustra una vista de las muestras preparadas para los análisis. Una vez preparadas, las muestras fueron sometidas a imágenes químicas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía cofocal Raman (CRM), además de petrografía convencional.

1



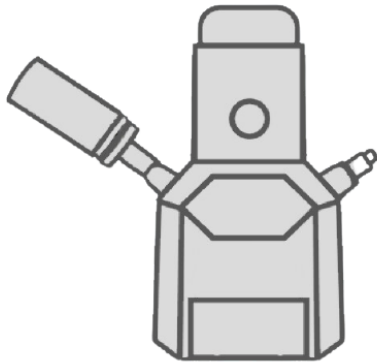
Extraction of samples

2



Polished cross-section

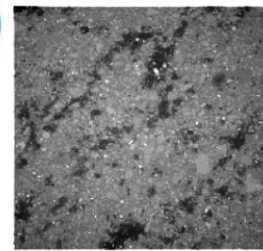
3



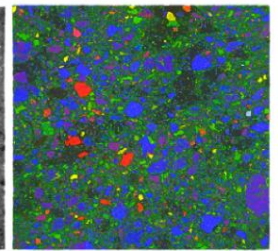
Energy dispersive spectroscopy (EDS)

Backscattered Electron Microscopy (BSEM)

4



Backscattered Electron Micrograph



EDS Elemental Mapping

Figura 3. Protocolo para los análisis de las muestras de materiales.

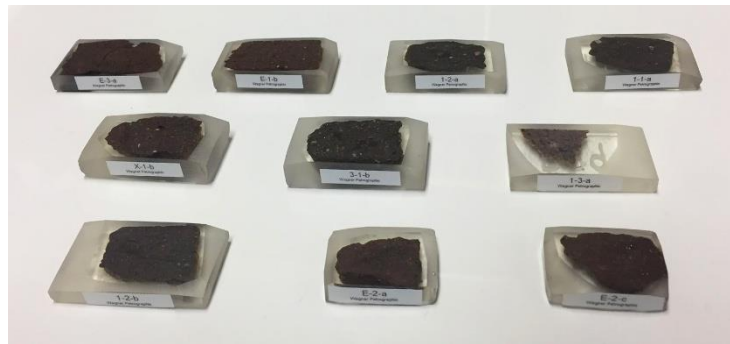


Figura 4. Ubicación de las zonas de colección de muestras de material.

RESULTADOS PRELIMINARES

2.1. Resultados del EDS

La Tabla 1 muestra la composición elemental promedio de las muestras extraídas en los edificios. La Figura 5 muestra también la distribución elemental de las distintas muestras en los diferentes edificios.

Todas las muestras presentan una alta concentración de aluminio (Al), silicio (Si) y calcio (Ca). Esto indica la presencia de arcilla y carbonato de calcio, comunes en el adobe [1][2]. En las unidades de Adobe y Tapia (todas las muestras excepto la muestra 1-3-a), la composición elemental es consistente en diferentes lugares y períodos.

Como se puede en la Figura 5, la composición elemental del Adobe es similar entre los diferentes edificios. A pesar de los cambios en la dominancia cultural del sitio a lo largo del tiempo, los materiales fundamentales utilizados para la construcción de estructuras de tierra se mantuvieron relativamente estables. Esto podría atribuirse al uso de una fuente local común de materiales. Asimismo, las similitudes en la composición elemental entre edificios asociados a diferentes culturas sugieren un posible intercambio cultural u homogeneidad en las prácticas de construcción.

Tabla 1. Datos de la composición elemental promedio de las muestras evaluadas en cada edificio.

Building	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Fe
1	5.92%	2.88%	17.99%	56.45%	2.91%	4.20%	5.56%	4.11%
3	5.56%	3.98%	18.99%	53.27%	2.68%	3.75%	6.72%	5.04%
E	6.05%	4.72%	18.89%	52.75%	2.34%	2.88%	6.66%	6.02%
I	5.83%	3.64%	18.21%	53.29%	2.86%	2.74%	8.07%	5.37%

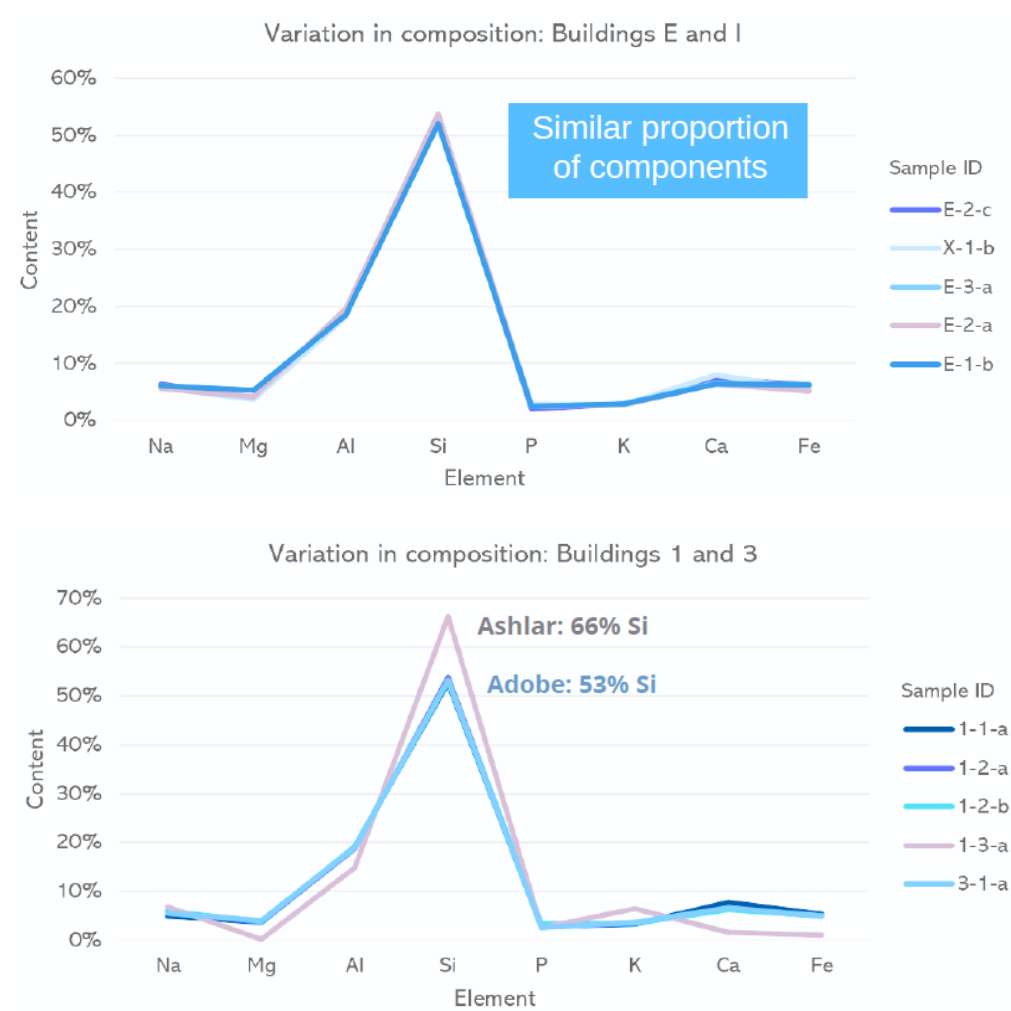


Figura 5. Variación de composición elemental respecto a los edificios y su tipo de ocupación.

Las piedras de Sillar empleadas en algunos edificios de El Huarco representan una modificación al estilo constructivo de la zona. El Sillar es un fragmento de roca volcánica, que a menudo contiene altos niveles de silicio y aluminio [3]. La figura 5 muestra que el Sillar tiene un mucho mayor contenido de Si que las otras muestras. La Figura 6 muestra que el Sillar también tiene un alto contenido de aluminio y una estructura más densa. Eso lo hace un material mejor de construcción y que se afecta menos por el deterioro ocasionado por el entorno marino.

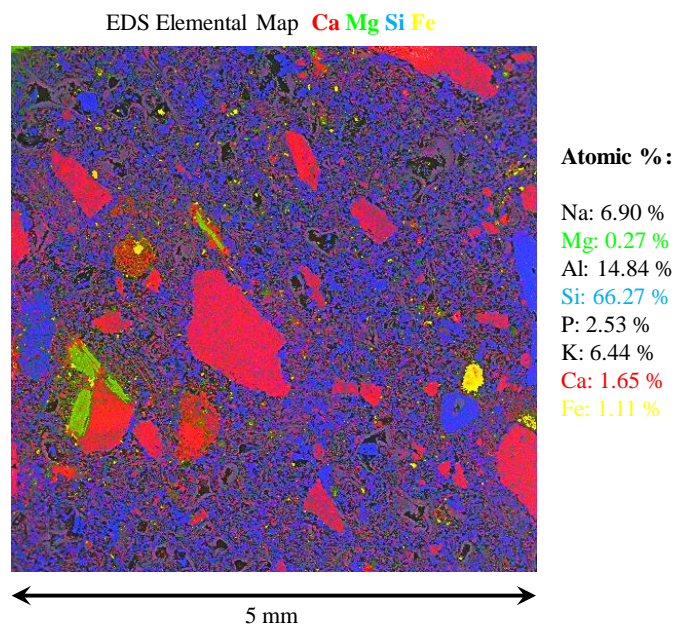


Figura 6. Evidencia del alto contenido de Si y Al en las muestras de Sillar.

2.2. Resultados del BSEM

La Figura 7 muestra la microestructura de las muestras de adobe de los edificios 1 y 3, mientras que la Figura 8 muestra el detalle de las muestras de los edificios E e I. Se puede notar que las muestras de los edificios Incas (1 y 3) presentan clastos de mayor tamaño, mientras que las muestras de los edificios E e I presentan clastos más pequeños y estructuras más compactas. Esto confirma principalmente el uso de diferentes métodos de construcción (adobe y tapia), ya que el Adobe suele usar material más granular para su fabricación.

Otro aspecto a tener en cuenta en las micro fisuras vistas en algunas muestras es la deposición de sales. Estas sales y la humedad del ambiente pueden dar lugar a la formación de grietas y vacío encontrados en las muestras de los edificios 1 y 3. Por tanto, se confirma el mayor deterioro asociado a los edificios que están más expuestos a la brisa marina y a la humedad.

Otro aspecto a reportar es la variabilidad en la microestructura de los materiales dentro de un mismo edificio y una misma zona. Los edificios de las mismas ocupaciones

muestran variabilidad entre los resultados, posiblemente causada por el deterioro o la antigüedad de las paredes. Otras fuentes de esta variabilidad puede ser la construcción secuencial, en las cuales se aprovechaba el material o adobes existentes y dañados para construir nuevos elementos encima de la construcción existente.

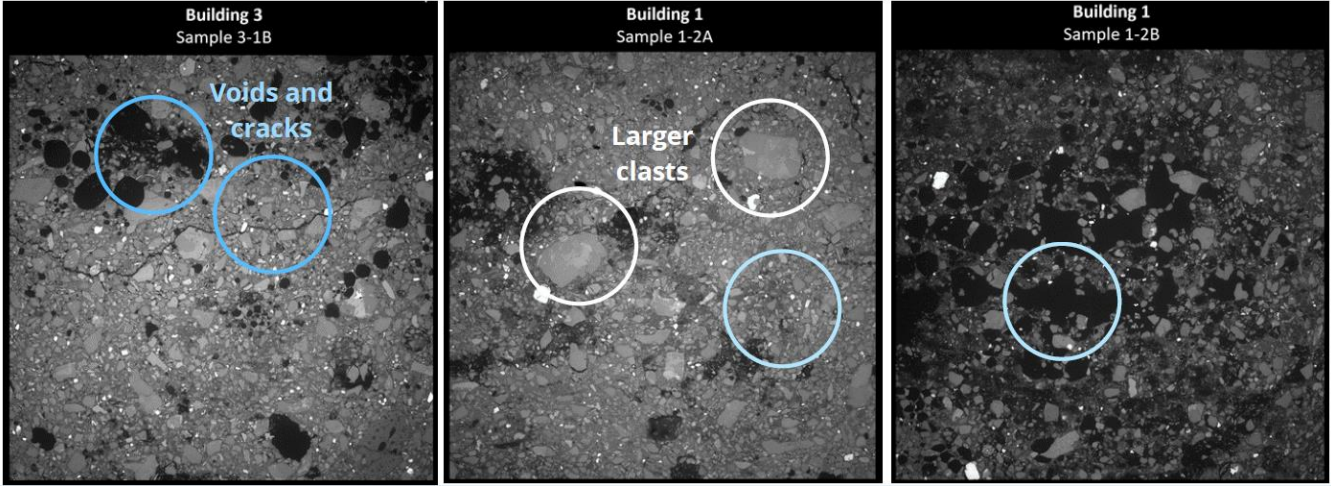


Figura 7. Resultados del BSEM para muestras de adobe de los edificios 1 y 3.

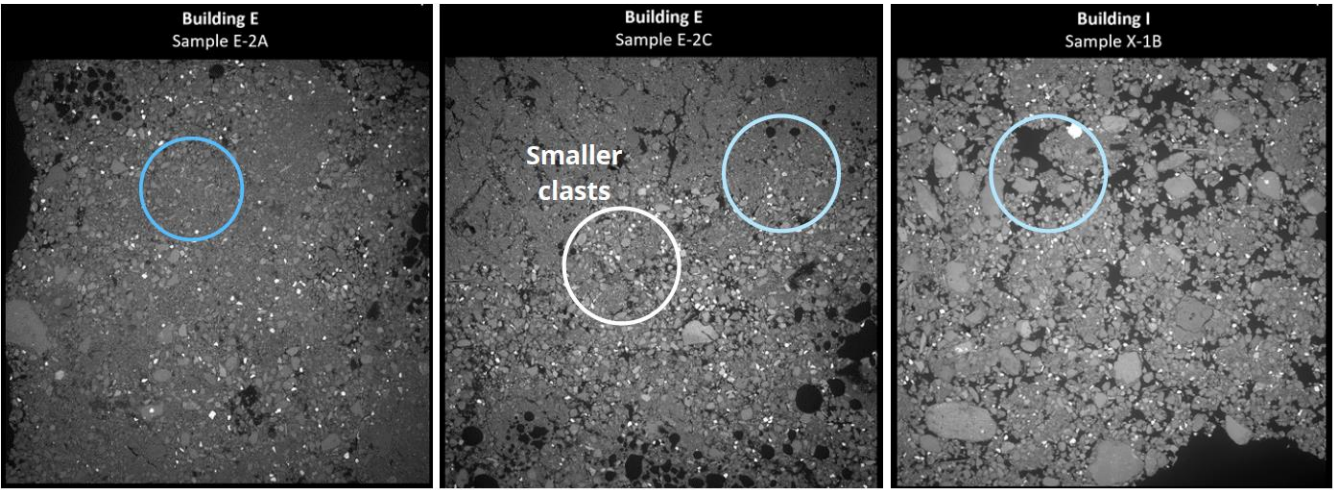


Figura 8. Resultados del BSEM para muestras de adobe de los edificios E e I.

La Figura 9 muestra la microestructura para las muestras de Sillar del edificio 1. La muestra 1-3-A presenta la menor cantidad de vacíos y una estructura general más compacta. Esta microestructura permite que las rocas volcánicas sean más duras y resistentes a la intemperie que materiales como el adobe. Esto confirma que el Sillar es un mucho mejor material para la construcción y restauración de estructuras arqueológicas.

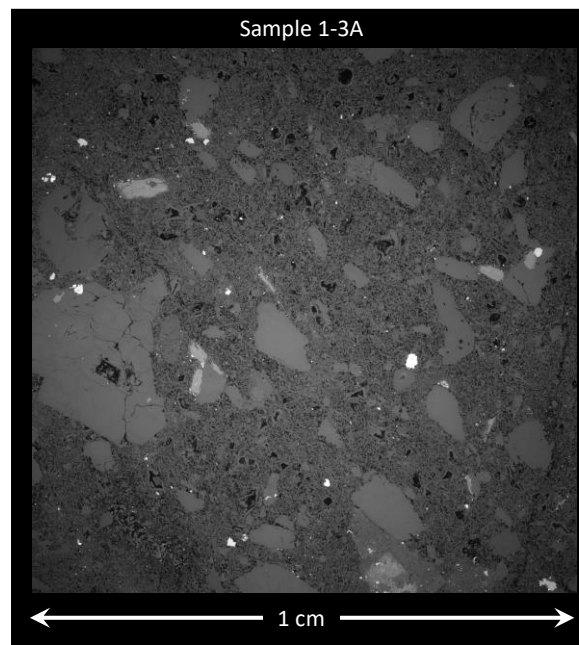


Figura 9. Resultados del BSEM para muestras de Sillar del edificio 1.

CONCLUSIONES

En base a los resultados presentados en este informe, se plantean las siguientes conclusiones:

Independientemente de los cambios culturales y las diferencias entre períodos históricos, se ha identificado una composición elemental consistente en las muestras de adobe y tapia en diferentes culturas, épocas y lugares. Esto sugiere el uso común de materiales locales y un posible intercambio o influencia cultural en los métodos de construcción. Esto

también puede indicar una cantera única para los materiales de construcción en los diferentes edificios y las diferentes ocupaciones.

Sin embargo, la estructura interna es diferente entre las diferentes muestras, indicando las diferencias entre su proceso constructivo (Adobe versus Tapial) y el estado de deterioro de los elementos. Las muestras de edificaciones 1 y 3 presentan clastos y vacíos de mayor tamaño, mientras que las muestras de edificaciones E e I presentan clastos más pequeños y estructuras más compactas.

La evaluación de la microestructura de las muestras evidenció que los muros de edificios más expuestos a la brisa marina (Edificios 1 y 3) muestran más vacíos y microfisuras en sus materiales. Esto es un indicio de la alta exposición a sales marinas y humedad que están afectando la estructura interna de los materiales. Por tanto, se requieren de acciones concretas para la conservación de los materiales y construcciones de El Huarco.

La muestra 1-3-a, hecha de sillar, presenta un mayor contenido de silicio y una estructura más compacta en comparación con las muestras de adobe. Esta diferencia refleja la distinta composición mineralógica y mecánica del sillar, al ser un fragmento de roca volcánica. Esta mayor densidad del material le permite menor permeabilidad y mejor resistencia a las sales y humedad del entorno. Por tanto, estos materiales son mejores para la construcción en esta zona.

BIBLIOGRAFIA

[1] Composition adobe <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/21009>

[2] Brito-del-Pino, José & Santamaría-Herrera, Nathalie & Macas-Peñaranda, Carlos & Tasan, Dany. (2021). ELABORACIÓN DE ADOBE SOSTENIBLE. DISEÑO ARTE Y ARQUITECTURA. 11. 59-79. 10.33324/daya.vi11.459.

[3] Composición sillar <https://doi.org/10.34098/2078-3949.38.1.2>