

ESTUDIO ESTRUCTURAL Y MICROESTRUCTURAL DE PIGMENTOS BLANCOS ARQUEOLÓGICOS DE LA SOCIEDAD MOCHE (200-750/800 D.C.) POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y REFINAMIENTO RIETVELD

STRUCTURAL AND MICROSTRUCTURAL STUDY OF ARCHAEOLOGICAL WHITE PIGMENTS FROM THE MOCHE SOCIETY (200-750/800 AD) BY X-RAY DIFFRACTION AND RIETVELD REFINEMENT

ELVIRA ZEBALLOS-VELÁSQUEZ^{1,a,†}, GABRIEL PRIETO^{2,b}, FRANK MOYA^{1,c}, LUIS LIZÁRRAGA^{1,d}, & ESTEBAN ASTO^{1,e}

¹ Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

² Departamento de Antropología, Universidad de Florida, 330 Newell Drive, Gainesville, Florida 32611, USA

(Recibido 2 de septiembre de 2024; aceptado 25 de noviembre de 2024)

<https://doi.org/10.53287/maft2297rx69w>

RESUMEN

Pampa La Cruz es uno de los complejos arqueológicos más importantes de la costa norte peruana. Uno de los principales desafíos es el estudio de sus pinturas murales y pigmentos, con fines de preservación y puesta en valor. Con esta perspectiva, el presente estudio fue orientado a determinar cualitativa y cuantitativamente la composición mineralógica de los pigmentos murales de este sitio e identificar la presencia de agentes de deterioro. Se aplicó la técnica de difracción de rayos X; las intensidades de difracción se analizaron por refinamiento de la estructura cristalina del modelo teórico, aplicando el método de Rietveld. Los resultados del refinamiento proporcionaron información sobre los parámetros a nivel de estructura y microestructura de cada fase identificada, además de su porcentaje en peso. En todas las muestras se identificó cuarzo, arcillas y sal halita. Estos resultados difieren de los obtenidos en investigación anterior respecto al pigmento blanco del sitio Huaca de La Luna.

Palabras clave: Pigmento – Microestructura – Difracción de rayos X – Método de Rietveld.

ABSTRACT

Pampa La Cruz is one of the most important archaeological complexes on the Peruvian north coast. One of the main challenges is the study of its wall paintings and pigments, for the purpose of preservation and enhancement. With this perspective, the present study was oriented to qualitatively and quantitatively determine the mineralogical composition of the wall pigments of this site and to identify the presence of deterioration agents. The X-ray diffraction technique was applied and the diffraction intensities were analyzed by the refinement of the crystal structure of the theoretical model applying the Rietveld method. The refinement results provided information on the parameters associated with the structure and microstructure of each identified phase, as well as, its weight percentage. Quartz, clays and halite salt were identified in all pigment samples. These results differ from those obtained in previous research regarding the white pigment from the Huaca de La Luna site.

Subject headings: Pigment – Microstructure – X-ray diffraction – Rietveld method.

1. INTRODUCCIÓN

Son diversas las dificultades en torno a la conservación y mantenimiento de los sitios arqueológicos de Perú, lo que, en la mayoría de los casos, hace inevitable su deterioro en el tiempo. Varios factores influyen en este deterioro, particularmente los relacionados con el medio ambiente, más aún cuando se trata de

sitios ubicados próximos al océano pacífico como los de la costa norte peruana, los cuales poseen pinturas murales y relieves en barro sensibles a los efectos de estos factores. Por ello, se requiere profundizar la investigación de estos y otros factores que podrían estar contribuyendo a este deterioro. Es indispensable, pues, una mayor atención a esta problemática, dar una justa valoración a este patrimonio cul-

^a<https://orcid.org/0000-0002-5957-1639>

^b<https://orcid.org/0000-0001-6229-986X>

^c<https://orcid.org/0000-0001-6320-3006>

^d<https://orcid.org/0000-0002-7049-2018>

^e<https://orcid.org/0000-0003-4366-6091>

^{a†} Email: ezeballosv@unmsm.edu.pe (correspondencia)

^b Email: ogabriel.prietob@ufl.edu

^c Email: frank.moya@unmsm.edu.pe

^d Email: luis.lizarraga4@unmsm.edu.pe

^e Email: elvis27anis@gmail.com

tural, mejorar las metodologías de investigación arqueométrica y aplicar los resultados obtenidos, todo esto en estrecha coordinación y colaboración multidisciplinaria.

A nivel de aplicación, estos estudios permiten desarrollar una mejor visión de, por ejemplo, cómo las sales afectan las estructuras de barro, frisos y pinturas murales, proponiendo nuevas y mejores técnicas en la prevención y conservación de estos importantes sitios arqueológicos. A nivel científico, permiten definir la naturaleza de los pigmentos utilizados en determinado sitio arqueológico y establecer si se trata de los mismos usados en otros sitios contemporáneos o si se trata de una variación local, determinando la procedencia, preparación y tipos de pigmentos usados.

Con estos propósitos, investigaciones con importantes resultados sobre uso de pigmentos y sobre todo en pinturas murales, sus fuentes, la elaboración de las mezclas colorantes y la proporción de sus componentes, han sido realizadas en diversos sitios arqueológicos de la región costera peruana, entre los cuales está Huaca de La Luna (Wright 2008; Zeballos-Velásquez et al. 2013), Tambo Colorado (Wright et al. 2015; Zeballos-Velásquez et al. 2019), Pampas Gramalote (Prieto et al. 2016), Pampa La Cruz (Zeballos-Velásquez et al. 2022), entre otros. En esta misma línea y aplicando la metodología utilizada en los estudios referidos arriba, el presente trabajo es otro esfuerzo para profundizar el estudio y la evaluación de los factores que afectan las estructuras de pinturas murales, trabajo cuyo contexto describimos seguidamente.

La sociedad Moche, desarrollada entre el 200 - 750/800 d.C. en la Costa Norte del Perú, se caracteriza por su alto desarrollo político, religioso, social y económico. Esta complejidad social se materializó en centros urbanos donde miles de personas desarrollaron actividades cotidianas y civiles. También, en estos centros urbanos, hábiles artesanos trabajaron los metales, cerámica, piedra y otros materiales para producir bienes suntuarios y domésticos. Junto a estos centros urbanos, los Moche construyeron monumentales templos prolijamente decorados con frisos de barro y pintura mural, bellamente ornamentados con pigmentos en su mayoría de origen mineral (Alva 1994; Bawden 1996; Chapdelaine 2001; Castillo & Uceda 2008; Donnan & McClelland 1999; Trever 2017; Bazán 2022). Poco se ha hecho a la fecha por investigar los sitios habitacionales rurales o donde vivió la gente común, que fue el grueso de la población. Algunas excepciones en el valle de Moche son los trabajos hechos por Brian Billman en el sitio de Cerro León (Brian et al. 2019), la compilación de sitios domésticos Moche en la margen derecha del valle del mismo nombre (Gamboa & Nesbitt 2012) y los trabajos realizados por el Programa Arqueológico Huanchaco desde el 2016 a la fecha en la zona de Huanchaco (Prieto et al. 2016; Fernandez & Prieto 2022). Las excavaciones arqueológicas realizadas en el sitio de Pampa La Cruz, en Huanchaco (litoral del valle de Moche), han arrojado datos muy importan-

tes para la comprensión de los aspectos cotidianos de la sociedad Moche.

Pampa La Cruz fue un sitio residencial de pescadores ubicado sobre una terraza marina, a unos 350 m de la orilla del mar. El sitio, durante la ocupación Moche, tuvo una extensión de aproximadamente 4 ha. donde el componente principal fueron conjuntos residenciales, posiblemente multifamiliares. En el extremo oeste, los Moche construyeron una plataforma ceremonial de 2 a 2.5 m de alto y unos 484 m² de extensión. Este edificio fue el resultado de muchas remodelaciones arquitectónicas, donde el elemento central fue una plataforma con rampa que miraba hacia el mar y donde hubo un altar/trono en forma de "U". Las paredes de este edificio fueron hechas con piedras de playa unidas con mortero de barro y enlucidas con un barro más fino, sobre las cuales algunas fueron pintadas con pigmentos principalmente blancos y rojos (Fernandez & Prieto 2022).

Durante las excavaciones arqueológicas de la temporada 2018 realizadas en el sitio arqueológico Pampa La Cruz (figura 1), se registró la primera evidencia de pinturas murales del Periodo Moche en un sitio no-monumental. Hasta la fecha, se creía que la decoración con pintura mural era exclusiva de sitios piramidales monumentales construidos con adobes de barro (Franco 2009, 2021; Trever 2022). Los hallazgos de Huanchaco cambian esta perspectiva e indican que la pintura mural también fue utilizada por los Moche para decorar estructuras ceremoniales menores en zonas residenciales, como aldeas de pescadores. Los murales identificados en Huanchaco presentaron colores rojo, blanco, azul, negro, marrón y amarillo. Debido a que estas pinturas murales no se encuentran en buen estado de conservación, en los últimos años han sido realizados esfuerzos para la investigación de los pigmentos empleados en las pinturas (Asto et al. 2022), a fin de determinar la presencia de sales u otros agentes contaminantes que contribuyen al deterioro de estas pinturas. Dichos estudios han sido realizados mediante análisis cualitativo/cuantitativo de su composición mineralógica y de aspectos estructurales relacionados con sus propiedades físicas.

La fuente más común de sales es el mar, de tal manera que cuando el monumento se halla cerca o frente al mar, su deterioro puede resultar severo (Al-Agha 2006; Mauricio et al. 2005; Andriani & Walsh 2007). El ambiente marino está constituido por partículas de niebla, las cuales contienen sales disueltas. Estas partículas son depositadas por el viento sobre las superficies y, dependiendo de las condiciones de temperatura, pueden cristalizar y llegar a formar capas de sal muy corrosivas, deteriorando así estas superficies. Entre las sales más agresivas están las que contienen iones de tipo cloruro (Mauricio et al. 2005) (como el cloruro de sodio o sal halita), causantes del mayor deterioro en monumentos próximos al mar (Al-Agha 2006; Harris 2001). Cuando estas sales son móviles (como el vapor de agua o la brisa marina), por acción del viento se depositan en los poros de las superficies y, al evaporarse



Fig. 1.— Pampa La Cruz. Sitio arqueológico ubicado en las cercanías del mar. Fuente: elaboración propia.

el agua, se sobresaturan y cristalizan dentro de los poros (Espinosa et al. 2008). Este proceso se conoce como criptoflorescencia, por el cual los cristales de sal ejercen presión y causan deterioro severo en la superficie, provocándole erosión y grietas (Al-Agha 2006; Andriani & Walsh 2007).

En la perspectiva de contribuir con la conservación y/o restauración de las pinturas murales de Pampa La Cruz y de sitios arqueológicos a lo largo de la costa norte peruana, en el presente trabajo se ha investigado arqueométricamente estos pigmentos, particularmente pigmentos blancos, aplicando la técnica de difracción de rayos X de polvo (DRX) (Azaroff 1968; Klug & Alexander 1974; Moore & Reynolds-Jr. 1997).

Las intensidades de los picos de difracción fueron analizadas por métodos analíticos y computacionales para identificar la composición mineralógica de las muestras. El análisis cuantitativo de esta composición fue realizado por refinamiento estructural, aplicando el método de Rietveld (Rietveld 2014; Santini 2015; Sabri et al. 2016; Mandal et al. 2020; Zeballos-Velásquez et al. 2020; Quiroga et al. 2021; Zeballos-Velásquez et al. 2022). Los resultados fueron comparados con los obtenidos en estudios previos sobre pigmentos del sitio Huaca de La Luna (Wright et al. 2015; Zeballos-Velásquez et al. 2019).

Adicionalmente, en este estudio se ha recogido información microestructural inicial sobre el tamaño de cristalito (Mittemeijer & Scardi 2004; García-Portillo et al. 2005; Pardo et al. 2011) de una de las fases de las muestras, aplicando el método de Scherrer (Azaroff 1968) y el método de Rietveld (Rietveld 2014), en perspectiva de una posterior investigación sobre la relación de estos resultados con propiedades físicas de estos materiales, particularmente con su resistencia a la intemperie.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras arqueológicas (fragmentos de mural con pigmento blanco) fueron recolectadas *in situ* (figura 2). Luego de esto, las muestras fueron clasificadas y catalogadas.

Todas las muestras fueron preparadas para las me-

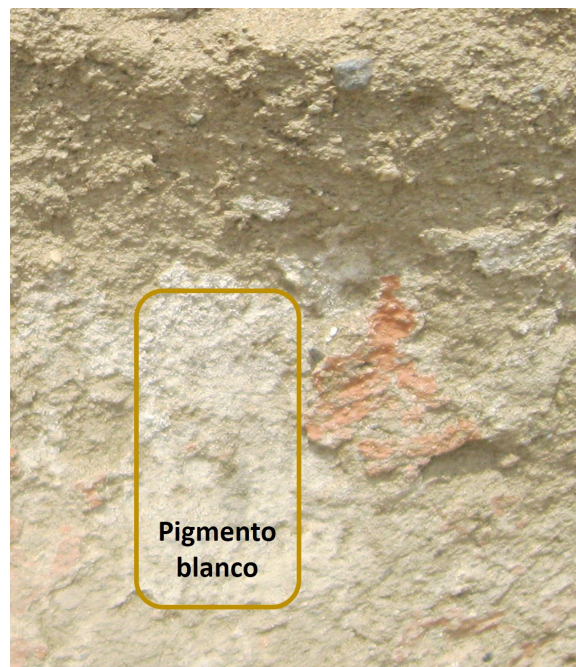


Fig. 2.— Pigmento blanco en mural del sitio Pampa La Cruz. Fuente: elaboración propia.

didadas de DRX: las capas finas de pigmento fueron retiradas cuidadosamente de la superficie de cada fragmento de mural, obteniéndose seis muestras (de 2 g cada una, aproximadamente). Los pigmentos así obtenidos fueron pulverizados y tamizados, luego catalogados (como PG-1, PG-2, PG-3, PG-4, PG-5, PG-6) y almacenados protegiéndolos de la humedad.

Las medidas de DRX fueron obtenidas con un difractómetro Shimadzu, modelo XRD-7000, geometría $\theta - \theta$ y radiación de $Cu (K_{\alpha})$ de $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, con contador de centelleo; fue usado un voltaje de 40 kV e intensidad de corriente de 30 mA. Las medidas fueron realizadas a temperatura ambiente, en el intervalo de 2.7° a 65° , con paso de 0.02° y 2 segundos por paso.

A partir de la evaluación de las medidas de DRX fue identificada la composición mineralógica de las muestras, aplicando métodos analíticos y computacionales. La determinación cuantitativa se realizó mediante el método de Rietveld, utilizando el programa TOPAS (DIFFRACplus 2020; TOPAS 2020), según la función PV-TCHZ (pseudo-Voigt Thompson-Cox-Hastings).

El tamaño de cristalito fue determinado por los métodos de Scherrer y Rietveld (Rietveld 2014). Mediante el método de Scherrer, el tamaño de cristalito fue calculado a partir de la ecuación de Scherrer (Azaroff 1968)

$$\beta = \frac{k\lambda}{w \cos \theta},$$

donde:

β : tamaño medio del cristalito,

k : factor de forma del cristal (0.94),

λ : longitud de onda de la radiación utilizada,

θ : posición angular del pico de difracción de máxi-

TABLA 1

Fases mineralógicas identificadas (COD: Crystallography Open Database).

FASES	PDF N°
Cuarzo	78-2315
Calcita	000-47-1743
Illita	COD 9009665
Yeso	00-021-0816
Halita	01-071-3741
Clorita	COD 9010165
Ortoclasa	000-71-1540
Riebeckita	COD 9004132
Andalucita	000-83-1510
Albita	01-089-6424
Moscovita	000-80-0742
Anortita	000-70-0287

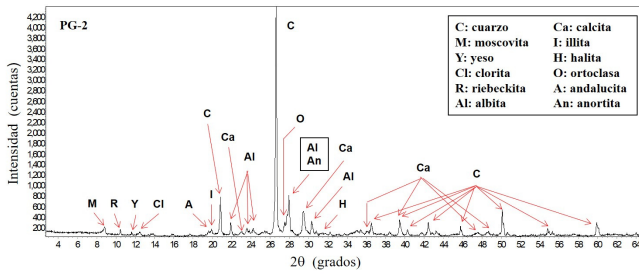


Fig. 3.— Fases identificadas en la muestra PG-2. Fuente: elaboración propia.

ma intensidad,

w : ancho a media altura del pico de difracción (expresado en radianes).

El cálculo por el método de Rietveld fue realizado aplicando la aproximación Doble-Voigt, la cual comprende convoluciones de componentes Lorentziana y Gaussiana que varían en 2θ en función de $1/\cos(\theta)$ y $\tan(\theta)$, respectivamente. La aproximación Doble-Voigt opera con el ancho integral del pico de difracción, no dependiendo de la forma del pico sino de su intensidad integrada (TOPAS 2020).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fueron identificadas fases de cuarzo, arcillas y sales (tabla 1). La figura 3 presenta el perfil de difracción de la muestra PG-2, con la indicación de los picos de cada fase identificada en esta muestra.

A partir de la identificación de las fases en cada muestra, fueron preparados los modelos estructurales teóricos para el refinamiento por el método de Rietveld. Para cada muestra, el refinamiento confirmó la identificación de cada fase. Las figuras 4 y 5 presentan los resultados, con los factores de ajuste del refinamiento (R_{exp} : factor residual esperado; R_{wp} : factor residual ponderado). Según la literatura (Toby 2006), los valores de estos factores son referenciales para decidir si un ajuste es o no satisfactorio, pero no sustituyen el raciocinio crítico del analista. La tabla 2 presenta el porcentaje en peso de cada fase.

Como puede verse en la tabla 2, los pigmentos tienen similar composición, con algunas excepciones como en el caso de la moscovita y anortita que no fue-

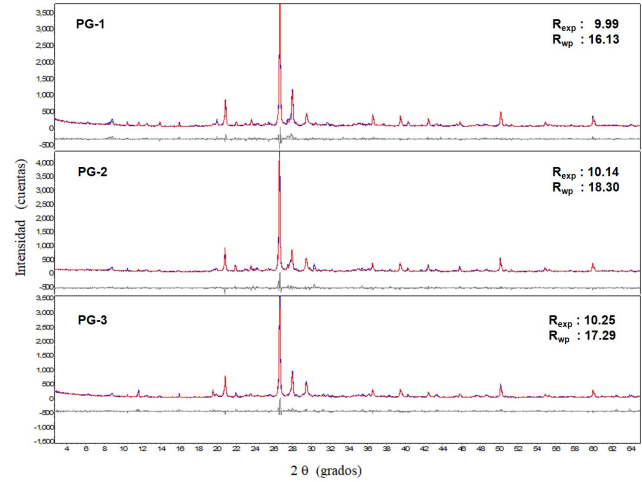


Fig. 4.— Refinamiento estructural por el método de Rietveld correspondiente a las muestras PG-1, PG-2 y PG-3. Fuente: elaboración propia.

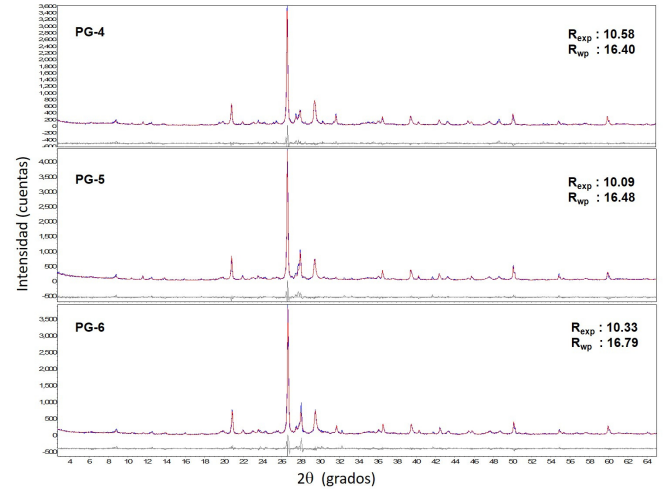


Fig. 5.— Refinamiento estructural por el método de Rietveld correspondiente a las muestras PG-4, PG-5 y PG-6. Fuente: elaboración propia.

TABLA 2

Porcentaje en peso de las fases identificadas.

FASES	PORCENTAJE EN PESO DE LAS (FASES IDENTIFICADAS (%))					
	MUESTRAS					
	PG-1	PG-2	PG-3	PG-4	PG-5	PG-6
Cuarzo	42.06	41.85	40.32	36.58	30.15	36.89
Calcita	9.20	1.93	12.60	16.82	15.71	16.98
Illita	10.70	9.71	11.19	20.48	20.02	14.98
Yeso	2.39	0.69	4.89	2.11	4.07	1.15
Halita	0.80	0.22	0.47	3.18	0.28	2.25
Clorita	7.08	4.85	5.59	4.17	5.98	4.35
Ortoclasa	3.86	4.31		1.18	2.91	3.64
Riebeckita	1.43	0.93	1.08	0.62	2.56	0.63
Andalucita	2.34	1.88	3.44	1.10	2.41	2.30
Albita	15.82	15.65	9.94	13.76	15.91	17.56
Moscovita	4.32	4.13	4.76			
Anortita		4.86	5.72			

TABLA 3

Resultados del porcentaje en peso de fases identificadas en pigmento blanco L-4 del sitio arqueológico Huaca de La Luna.

PORCENTAJE EN PESO FASES (%)					
Cuarzo	Illita	Albita	Brushita	Caolinita	Tobermorita
70.50	9.23	3.94	4.57	6.21	5.56

ron identificadas en las muestras PG-4, PG-5 y PG-6. Todas las muestras contienen un alto porcentaje de cuarzo ($> 30\%$) y diversas fases de arcilla; la abundancia en cuarzo podría deberse a su uso como componente aditivo durante la preparación del pigmento blanco, actuando como pigmento extensor, a fin de mejorar las propiedades del pigmento blanco, tales como su durabilidad y resistencia a la corrosión o al desgaste (ALPA-Powder 2021; Geoterra-Dominicana 2023; Encyclopaedia-Britannica 2024).

Las fases de calcita y yeso presentes en las muestras podrían ser las responsables del color. En todas las muestras fue identificada adicionalmente una fase de halita (sal) en pequeño porcentaje: $< 1\%$ en las muestras PG-1, PG-2, PG-3 y PG-5 y $< 4\%$ en las muestras PG-4 y PG-6. La presencia de esta sal probablemente se deba a la brisa marina (debido a la cercanía del sitio arqueológico al mar), lo que podría haber contribuido al deterioro de estas pinturas murales (Jimenez et al. 2017).

Estos resultados difieren de los obtenidos en investigación anterior respecto al pigmento blanco del sitio Huaca de La Luna. Asimismo, difieren cualitativa y cuantitativamente de nuestros resultados obtenidos en trabajo previo (Zeballos-Velásquez et al. 2013), los cuales mostramos en la tabla 3.

Puede observarse que la composición mineralógica de los pigmentos blancos procedentes del sitio Pampa La Cruz contiene mayor cantidad de fases (doce, en promedio) que la de los pigmentos de Huaca de La Luna (seis), además de ser cualitativamente diferentes, salvo las fases de cuarzo, illita y albita que están presentes en ambos grupos de pigmentos.

También fueron investigados los enlucidos (soportes) de estos pigmentos, cuyos resultados fueron publicados en trabajo anterior (Asto 2022). En los enlucidos fueron identificadas fases de cuarzo, calcita, albita, andalucita, caolinita, yeso, clorita, moscovita, ortoclasa, andesina y hornblenda; en algunos enlucidos también fue identificada sal halita.

En relación al análisis del tamaño de cristalito, fue considerado el efecto instrumental en las medidas de difracción, utilizando una muestra estándar de Si. El análisis fue desarrollado a partir de la evaluación del pico (104) de la fase de calcita en todas las muestras, el cual no presenta superposición con otros picos del perfil de difracción.

El procedimiento aplicado según el método de Scherrer es ilustrado gráficamente por las figuras 6 y 7. La figura 6 presenta las posiciones angulares respecto al ancho a media altura del pico (111) de la muestra patrón de Si y la figura 7 presenta estas posiciones respecto al ancho a media altura del pico (104) de la calcita en la muestra PG-2.

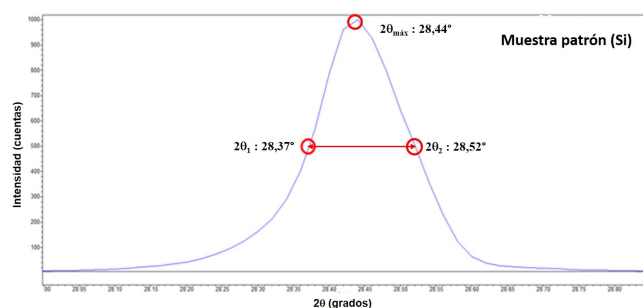


Fig. 6.— Posiciones angulares respecto al ancho a media altura del pico (111) de la muestra patrón de Si. Fuente: elaboración propia.

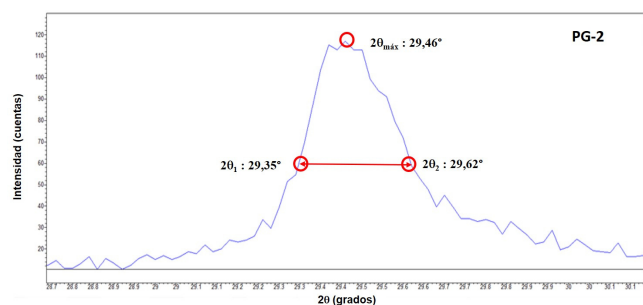


Fig. 7.— Posiciones angulares respecto al ancho a media altura del pico (104) de la fase de calcita de la muestra PG-2. Fuente: elaboración propia.

TABLA 4

Parámetros para determinar el tamaño de cristalito de la fase de calcita, según el pico (104), aplicando el método de Scherrer.

MUESTRAS	PARÁMETROS		
	$2\theta_{max} (^{\circ})$	$\Delta 2\theta (^{\circ})$ ($2\theta_2 - 2\theta_1$)	w (radianes)
Muestra patrón (Si)	28.44	0.15	0.002618
PG-1	29.50	0.29	0.004328
PG-2	29.46	0.27	0.003909
PG-3	29.48	0.25	0.003490
PG-4	29.50	0.28	0.003743
PG-5	29.49	0.30	0.004188
PG-6	29.50	0.31	0.004405

Este mismo procedimiento fue aplicado para la fase de calcita en todas las muestras, cuyos resultados presentamos en la tabla 4. Comparativamente, la tabla 5 presenta los resultados del tamaño de cristalito según el pico (104) de la calcita, obtenidos por los métodos de Scherrer y Rietveld.

En la tabla 5 podemos ver que el cálculo del tamaño de cristalito por ambos métodos reportan resultados similares. La pequeña diferencia entre ellos podría deberse a que la aproximación de Scherrer es aplicada tomando en cuenta el ancho de pico a media altura, mientras que el método de Rietveld hace el cálculo operando con el ancho integral del pico de difracción (TOPAS 2020), el cual no depende de la forma del pico sino de su intensidad integrada. En ambos casos, es fundamental realizar una correcta caracterización de la función instrumental.

TABLA 5

Tamaño de cristalito de la calcita, según el pico (104), obtenido por los métodos de Scherrer y de Rietveld. ($k = 0.94$ y $\lambda = 1.5418\text{\AA}$).

MUESTRAS	TAMAÑO DE CRISTALITO (nm)	
	Método de SCHERRER	Método de RIETVELD
PG-1	34.624	33.698
PG-2	38.330	33.036
PG-3	42.932	36.522
PG-4	40.046	36.338
PG-5	35.784	36.338
PG-6	34.028	31.333

4. CONCLUSIONES

En todos los pigmentos fue identificado un alto porcentaje de cuarzo ($> 30\%$) y arcillas en porcentajes menores. La abundancia en cuarzo podría ser resultado de su incorporación como pigmento extensor, para mejorar algunas de las propiedades del pigmento blanco, tales como su durabilidad y resistencia a la corrosión o al desgaste.

Fueron identificadas fases de calcita y yeso, las cuales podrían ser las responsables del color. Adicionalmente, en estos pigmentos fue identificada fase de halita en baja proporción: $< 1\%$ en la mayoría de las muestras. Esto induce a concluir que esta sal, al depositarse en la superficie del mural, produce su deterioro.

En una perspectiva comparativa, no se ven correlaciones cercanas con los pigmentos analizados del sitio Huaca de La Luna, contemporáneo con Pampa La Cruz, lo que supone distintas esferas de interacción y aprovisionamiento de estos pigmentos de un sitio respecto al otro.

De los resultados obtenidos en el estudio microestructural, se aprecia que la aproximación de Scherrer proporciona estimaciones del tamaño medio de cristalito compatibles con los obtenidos en el análisis por el método de Rietveld. Un análisis más detallado de estos resultados, asociados a la resistencia a la intemperie, podría contribuir a la preservación de estos materiales.

AGRADECIMIENTOS

Las excavaciones arqueológicas desarrolladas en 2018, donde se halló la primera evidencia de pinturas murales en Huanchaco, fueron auspiciadas por la National Geographic Society, Grant # 305R-18. En 2019, las excavaciones arqueológicas en Pampa La Cruz y los análisis posteriores de los pigmentos y enlucidos fueron financiados por el Convenio 007-2018 entre la Universidad Nacional de Trujillo, Universidad Nacional Mayor de San Marcos y FONDECYT-CONCYTEC, Banco Mundial.

Agradecemos a Victor Fernandez y Andres Shiguekawa, personal del área de conservación, quienes dieron las direcciones para la conservación de las pinturas murales y enlucidos, tanto en campo como posteriormente en la discusión sobre los elementos pertinentes de estudio en las muestras.

Esta investigación fue financiada por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (RR. N° 005753-2021-R/UNMSM, con código de proyecto B21131621 y RR. N° 011794-2022-R/UNMSM, con código de proyecto B22130012).

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses respecto a la publicación de este documento.

REFERENCIAS

- Al-Agha, M. R. 2006, *Building and Environment*, 41(5), 676
- ALPA-Powder. 2021, Procesamiento y aplicación de cuarzo en polvo, <https://www.alpapowder.com/es/114041/>
- Alva, W. 1994, Sipán: descubrimiento e investigación. Cultura y artes del Perú (Cervecería Backus y Johnston)
- Andriani, G. F. & Walsh, N. 2007, *Geological society, London, special publications*, 271, 179
- Asto, E. 2022, <https://hdl.handle.net/20.500.12672/18993>
- Asto, E., Lizarraga, L., Zeballos, E., & Prieto, G. 2022, *Revista de Investigación de Física*, 25(3)
- Azaroff, L. V. 1968, *Elements of X-ray crystallography* (McGraw-Hill)
- Bawden, G. 1996, *The Moche. The peoples of America* (Oxford, U.K.; Cambridge, Mass.; Blackwell)
- Bazán, A. 2022, *El Contexto Funerario de la Señora de Cao* (Fundación Wiese, Lima, Perú)
- Brian, B., Ringberg, J., Bardolph, D., & no, J. B. 2019, *Actas de la Primera Mesa Redonda de Trujillo. Nuevas perspectivas en la arqueología de los valles de Virú, Moche y Chicama*, Compiladores: G. Prieto y A. Boswell (Fondo Editorial UNT, Trujillo, Perú)
- Castillo, L. J. & Uceda, S. 2008, *The Mochicas*. En *The Handbook of South American Archaeology*, editado por Helaine Silverman y William H. Isbell (Springer New York, New York, NY.)
- Chapdelaine, C. 2001, *Moche Art and Archaeology in Ancient Peru*, editado por J. Pillsbury (Studies in the History of Art. Center for Advanced Studies in the Visual Arts, Symposium Papers XL, Washington, D.C.)
- DIFFRACplus. 2020, TOPAS/TOPAS R/TOPAS P. Technical Reference
- Donnan, C. & McClelland, D. 1999, *Moche fineline painting : its evolution and its artists* (UCLA Fowler Museum of Cultural History, Los Angeles, California)
- Encyclopaedia-Britannica. 2024, Extender pigment, <https://www.britannica.com/technology/extender-pigment>
- Espinosa, R. M., Franke, L., & Deckelmann, G. 2008, *Matter. res. soc. symp. proc.*, 1047
- Fernandez, A. & Prieto, G. 2022, *Arqueológicas*, 31, 45
- Franco, R. 2009, *Mochica: los secretos de Huaca Cao Viejo* (Fundación Wiese, Lima, Perú)
- . 2021, *Huaca Cao Viejo, El Templo Mayor*. En *El Contexto Funerario de la Señora de Cao. Hallazgo e Investigación de Entierros de Elite Mochica en la Huaca Cao Viejo, Complejo Arqueológico El Brujo*, editado por Augusto Bazán (Fundación Wiese, Lima, Perú)
- Gamboa, J. & Nesbitt, J. 2012, *Arqueología y Sociedad*, 25, 115
- García-Portillo, C., Bastida, J., Pardo, P., Rodríguez-López, G., Larcuz, M. J., Vilar, M. L., & Lazaro, A. 2005, *Bol. Soc. Esp. Ceram.*, 44(3), 239

- Geoterra-Dominicana. 2023, Silica sand in the paint and coatings industry: Improving aesthetics and performance, <https://www.geoterradominicana.com/en/articles/silica-sand-in-the-paint-and-coatings-industry-improving-aesthetics-and-performance/>
- Harris, B. 2001, A discussion paper for the air quality working group of the bradford-on-avon preservation trust 3, 4, 15
- Jimenez, J., Espriu-Gascona, A., Bastos-Arrieta, J., & Pabloa, J. 2017, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 14, 174
- Klug, H. P. & Alexander, L. E. 1974, *X-Ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials* (John Wiley & Sons, USA)
- Mandal, S., Pramanick, A., Chakraborty, S., & Dey, P. 2020, *Materials Today: Proceedings*, 33, 5664
- Maurício, A., Pacheco, A., Brito, P., Castro, B., Figueiredo, C., & Aires-Barros, I. 2005, *Journal of cultural heritage*, 6, 287
- Mittemeijer, E. J. & Scardi, P. 2004, *Diffraction Analysis of the Microstructure of Materials*, Springer Series in Materials Science (Springer-Verlag Berlin Heidelberg)
- Moore, M. M. & Reynolds-Jr., R. C. 1997, *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*, 2nd. Ed. (Oxford University Press, Oxford)
- Pardo, P., Huertas, F. J., Kojdecki, M. A., & Bastida, J. 2011, *Crystallite size evolution in hydrothermal formation of kaolinite*, *Zeitschrift für Kristallographie, Supplement* (Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München)
- Prieto, G. & Chavarria, H. 2017, *ARKINKA*, 261, 78
- Prieto, G., Wright, V., Burger, R. L., Cooke, C. A., Zeballos-Velasquez, E. L., Watanave, A., Suchomel, M. R., & Suescun, L. 2016, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5, 45
- Quiroga, M., Zeballos-Velásquez, E. L., & Reyes, F. A. 2021, *Revista Mexicana de Física*, 67, 0611602
- Rietveld, H. 2014, *Physica Scripta*, 89, 098002
- Sabri, K., Rais, A., Taibi, K., Moreau, M., Ouddane, B., & Addou, A. 2016, *Physica B: Condensed Matter*, 501, 38
- Santini, T. 2015, *International Journal of Mineral Processing*, 139, 1
- Toby, B. H. 2006, *Powder Diffraction*, 21, 67
- TOPAS. 2020, *User's Manual*
- Treuer, L. 2017, *The archaeology of mural painting at Panamarca, Peru. Studies in Pre-Columbian Art and Archaeology* (Dumbarton Oaks Research Library and Collection, Washington D.C.)
- . 2022, *Image encounters: Moche murals and archaeo art history*. First edition. ed. Moche murals and archaeo art history (University of Texas Press, Austin, Texas)
- Wright, V. 2008, *Étude de la polychromie des reliefs sur terre crue de la Huaca de la Luna Trujillo, Pérou* (British Archaeological Reports)
- Wright, V., Pacheco, G., Torres, H., Huaman, O., Watanave, A., Zeballos-Velasquez, E. L., Suchomel, M. R., Suescun, L., Moulin, C., & Melero, P. C. 2015, *STAR: Science & Technology of Archaeological Research*, 1, 11
- Zeballos-Velásquez, E., Prieto, G., Arrelucea, L., Mejía, M., Andia, M., & Moya, F. 2022, *Revista Matéria*, 27
- Zeballos-Velásquez, E., Prieto, G., Suescun, L., Asto, E., & Moya, F. 2020, *Revista Matéria*, 25
- Zeballos-Velásquez, E., Wright, V., Suescun, L., & Asto, E. 2019, *Revista Matéria*, 24
- Zeballos-Velásquez, E. L., Wright, V., Watanave, A., & Melero, P. 2013, *Coloquio Internacional Tiahuanaco 1903 - La Paz 2013: 110 años de colaboraciones arqueológicas franco-americanas* (Instituto Francés de Estudios Andinos, Centro de Estudios Mexicanos y Centro Americanos, Museo Nacional de Etnografía y Folklore de La Paz, La Paz, Bolivia)