



# IMÁGENES AÉREAS SISTEMÁTICAS Y DOCUMENTACIÓN DEL SITIO ARQUEOLÓGICO DE HUARI: UNA ACTUALIZACIÓN Y PERSPECTIVAS PARA EL FUTURO

## SYSTEMATIC AERIAL IMAGING AND DOCUMENTATION OF THE ARCHAEOLOGICAL SITE OF HUARI: AN UPDATE AND PERSPECTIVES FOR THE FUTURE

Justin Jennings<sup>1,2</sup>, Steven Wernke<sup>3</sup>, Stephen Berquist<sup>2</sup>, Felipe Gonzalez Macqueen<sup>4</sup>, Natalie Robbins<sup>3</sup>,  
Giles Spence-Morrow<sup>2,3</sup> y James R. Zimmer-Dauphinee<sup>3</sup>

El sitio de Huari, centro una vasta formación política expansionista, se cuenta entre las ciudades más grandes de Sudamérica precolombina. La ciudad existió durante aproximadamente cuatrocientos años durante el Horizonte Medio (600-1000 EC). Señalado como uno de los primeros centros de la civilización andina por Cieza de León en el siglo XVI, e investigado por primera vez por Julio C. Tello en 1931, se ha establecido su importancia a través de casi un siglo de investigación arqueológica. Sin embargo, la misma escala del sitio ha complicado la comprensión de su organización espacial. Hasta la fecha, solo existen planos esquemáticos de la ciudad sobre la base de fotos aéreas y sectores mejores documentados a través de levantamiento cartográfico en el campo. Para comprender mejor el sitio, en 2017 el Museo Real de Ontario y la Universidad de Vanderbilt organizaron un proyecto conjunto de registro espacial que cubrió la porción de más de 2 km<sup>2</sup> del sitio que contiene arquitectura permanente. Este artículo analiza la historia de los proyectos de levantamiento cartográfico de Huari antes de 2017, así como la metodología que usamos para adquirir y procesar ortomosaicos de Huari en gran parte mediante el uso de drones (UAV). Nuestro proyecto produjo imágenes en la mayoría del asentamiento con una resolución de hasta ~ 3 cm, disponible hoy para exploración y descarga en [www.huarimappingproject.org](http://www.huarimappingproject.org). La plataforma se puede actualizar a medida que haya más imágenes disponibles. Los ortomosaicos, así como los modelos derivados de ellos, se pueden utilizar para respaldar la investigación futura y los programas de preservación del patrimonio.

**Palabras claves:** Huari, cartografía, teledetección, drones, modelado de sitios.

*The site of Huari, center of a vast expansionist political formation, was the largest city ever constructed in Pre-Columbian South America. The city existed for approximately four hundred years during the Middle Horizon (600-1000 CE). Noted as an early center of Andean civilization by Cieza de León in the 16th century, and first investigated by Julio C. Tello in 1931, the importance of the site has been established through almost a century of archaeological research. Nonetheless, the very scale of the site itself has complicated understanding of its spatial organization. To date, only sketch plans from aerial imagery of the city exist, with some sectors better documented through field-based cartographic survey. To better understand the site, the Royal Ontario Museum and Vanderbilt University organized a joint documentation and modeling project in 2017 that covered the more than 2 km<sup>2</sup> portion of the site that contains standing architecture. This article discusses the history of Huari mapping and documentation projects prior to 2017, as well as the methodology we used to acquire and process orthomosaics of Huari largely through the use of drones (UAVs). Our project produced imagery across much of the settlement at a resolution as high as ~3 cm that is now available for exploration and download at [www.huarimappingproject.org](http://www.huarimappingproject.org). The platform can be updated as more imagery becomes available. The orthomosaics, as well as models derived from them, can be used to support future research and heritage preservation programs.*

**Key words:** Huari, cartography, remote sensing, drones, site modeling.

Investigada por primera vez en julio de 1931 por Julio C. Tello (2009 [1931], 1942), Huari estuvo entre las ciudades más grandes de Sudamérica precolombina. Una comprensión más profunda de la ciudad y sus alrededores es necesaria para mejor comprender los

procesos dinámicos políticos, económicos e ideológicos que se produjeron durante el Horizonte Medio. Su documentación detallada también puede servir como fundamento para programas contemporáneos de gestión del patrimonio cultural. El estado de conocimiento

<sup>1</sup> Royal Ontario Museum, Toronto, Canada. [justinj@rom.on.ca](mailto:justinj@rom.on.ca), ORCID ID: 0000-0003-1323-153X

<sup>2</sup> University of Toronto, Toronto, Canada. [stephen.berquist@mail.utoronto.ca](mailto:stephen.berquist@mail.utoronto.ca), ORCID ID: 0000-0001-6607-0691

<sup>3</sup> Vanderbilt University, Nashville, USA. [s.wernke@vanderbilt.edu](mailto:s.wernke@vanderbilt.edu), ORCID ID: 0000-0001-8180-9896; [natalie.n.robbins@vanderbilt.edu](mailto:natalie.n.robbins@vanderbilt.edu), ORCID ID: 0000-0002-5918-1956; [giles.spence.morrow@vanderbilt.edu](mailto:giles.spence.morrow@vanderbilt.edu), ORCID ID: 0000-0001-8010-0172; [james.r.zimmer-dauphinee@vanderbilt.edu](mailto:james.r.zimmer-dauphinee@vanderbilt.edu), ORCID ID: 0000-0003-1489-7747

<sup>4</sup> Avenza Systems, Toronto, Canada. [felipe.macqueen@gmail.com](mailto:felipe.macqueen@gmail.com)

Recibido: agosto 2022. Aceptado: marzo 2024.

<http://dx.doi.org/10.4067/s0717-73562024005000101>. Publicado en línea: 27-mayo-2024.

arqueológico sobre Huari ha mejorado mucho en años recientes gracias a prospecciones, excavaciones y análisis recientes de materiales (p.ej., Cabrera y Ochatoma Paravicino 2019; Cabrera Romero et al. 2021a, 2021b; Ochatoma Paravicino et al. 2015, 2021; Pérez Calderón 1999, 2001, 2017; Valdez y Valdez 2017). Sin embargo, el registro cartográfico de la ciudad queda por realizar fuera de las zonas de excavación. Las dificultades de la época de conflicto en Ayacucho (mayormente durante la década de 1980) y las dificultades de coordinación entre los desafíos de coordinación entre proyectos, la intensificación de la agricultura y la proliferación de arquitectura moderna han complicado la creación de un mapa completo de restos arqueológicos.

En este artículo, se presentan resultados iniciales de nuestro proyecto aerofotogramétrico por drones para documentar y modelar los vestigios arquitectónicos de Huari desde el año 2017. Este proyecto reunió investigadores y equipos del Museo Real de Ontario, la Universidad de Vanderbilt y la Universidad de Toronto. El equipo de campo trabajó en estrecha colaboración con William Isbell de SUNY-Binghamton y José Ochatoma de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, quienes tenían permisos para excavar en Huari durante este tiempo o en temporadas anteriores.

En el presente artículo analizamos, previos esfuerzos de registro espacial, nuestra recolección de imágenes aéreas con drones en 2017, los pasos fotogramétricos para procesar las imágenes a productos geoespaciales, junto con su organización como base de datos, y las perspectivas para la investigación y la gestión del patrimonio de una plataforma digital de Huari de acceso abierto y actualizable (para ejemplos del uso de drones en proyectos de cartografía arqueológica y patrimonio cultural, véase Castillo et al. 2019; Fritz 2007; Pierdicca et al. 2016; Wernke et al. 2016; Wernke et al. 2017).

Es importante señalar que nuestra meta *no* es producir un plano definitivo de Huari, sino avanzar su documentación de manera incremental y abierta para la comunidad de investigación. Los datos de la plataforma se pueden utilizar como una herramienta de apoyo para investigaciones presentes y futuras en su planificación, registro espacial y ejecución. Los datos presentados así también sirven como registro archival del estado del sitio en 2017. Se puede añadir registros subsecuentes para observar sus cambios en cobertura vegetal, el saqueo, la erosión, y otros procesos tafonómicos. En estos sentidos, el valor que

esperamos contribuir aquí reside tanto en el contenido de los datos recolectados como en la manera de su registro y las oportunidades de intercambio escolar que proporciona.

### Esfuerzos de Mapeo Anteriores

Los primeros mapas de Huari, como este realizado por Wendell Bennett (1953) (Figura 1), fueron bocetos de mapas creados durante breves visitas de campo. Obras arqueológicas más sostenidas y amplias en el sitio comenzaron durante la década de 1960 como parte del Proyecto Arqueológico-Botánico Ayacucho-Huanta dirigido por Richard MacNeish (1982). Este trabajo proporcionó un sentido más claro de las dimensiones de la ciudad, una expansión arquitectónica de más de 2 km<sup>2</sup>, con unos 8 km<sup>2</sup> más de dispersión de cerámica en la superficie que rodea esta área, pero no produjo un mapa del asentamiento. William Isbell y sus colegas realizaron el primer mapa parcial de la ciudad en 1974 (Isbell et al. 1991) (Figura 2). El equipo de la Universidad de Binghamton usó un teodolito y estaba para levantar un plano de los muros visibles dentro de un área de aproximadamente 2 x 0,7 km del sitio. El avance de este trabajo fue complicado debido a la cubierta de cactus y otros obstáculos. Por lo tanto, aumentaron su plano con rasgos calcados de fotos aéreas de la década de 1970, tomadas por el Servicio Aerofotográfico Nacional de Perú (Figura 3).

El mapa de 1974 continuó sirviendo como la mejor aproximación de referencia del sitio durante la época del conflicto violento en Ayacucho. Fue utilizado ampliamente por arqueólogos y el público en general durante más de 30 años para representar a Huari. En 2007, se elaboró un nuevo plano como parte del *Plan de Manejo y Programa de Uso Turístico del Complejo Arqueológico de Wari* (Lumbreras 2010) (Figura 4). El estudio dirigido por Luis Lumbreras definió claramente los límites del sitio a través de una prospección, y el proyecto generó un plano más extensivo de las murallas principales de Huari sobre la base del estudio de las mismas fotos aéreas de los años setenta utilizadas por Isbell y colegas. El mapa de Lumbreras es una herramienta esencial para el Plan de Manejo de Huari, lo que subraya la urgente necesidad de contar con información espacial sobre el sitio para guiar la investigación académica futura y el desarrollo del patrimonio.

Aunque los primeros pasos son importantes, tanto el plano de Isbell como el de Lumbreras tienen limitaciones significativas. Los muros altos y la

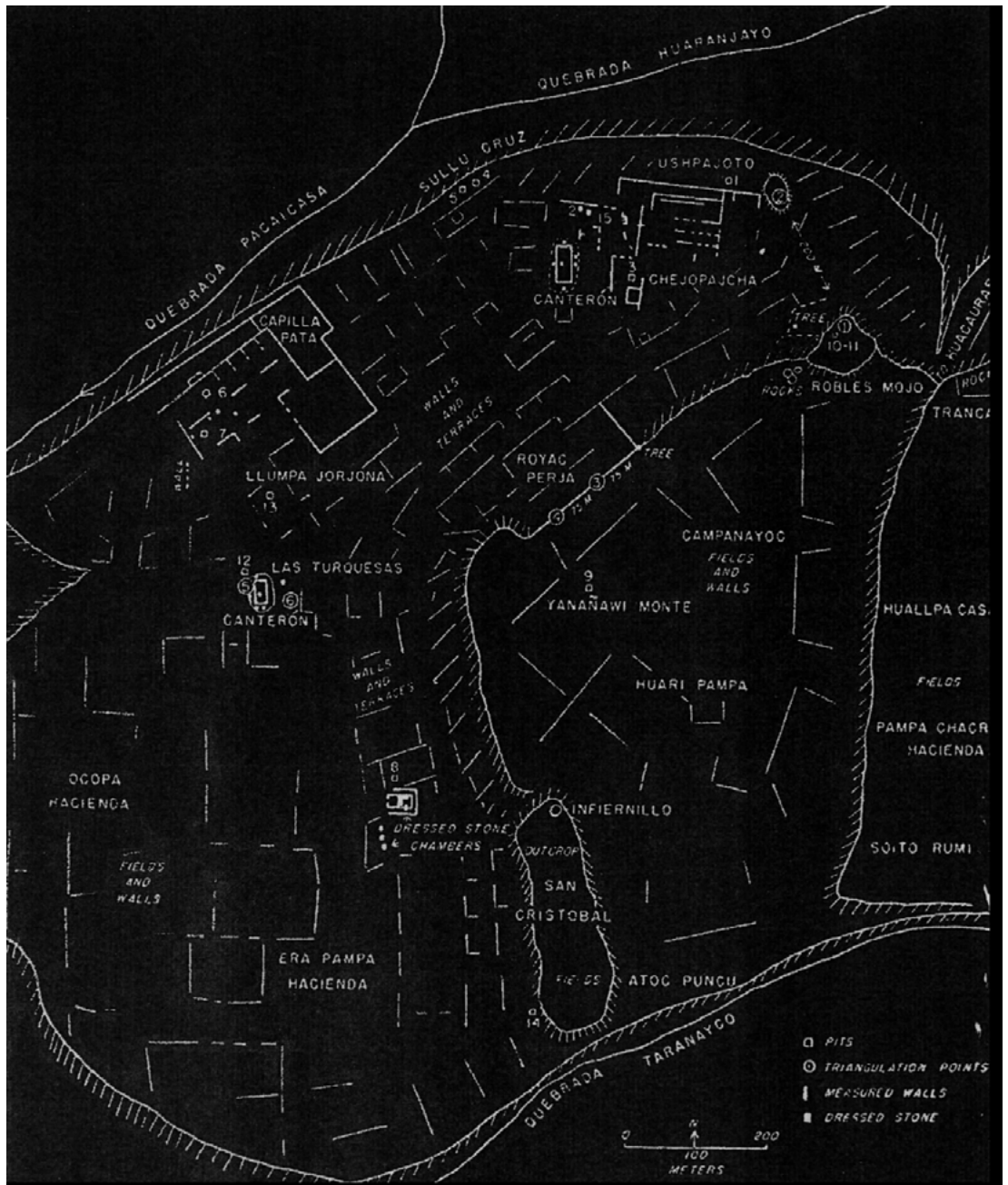


Figura 1. Mapa de Huari de Wendell Bennett en 1950.

*Map of Huari by Wendell Bennett in 1950.*

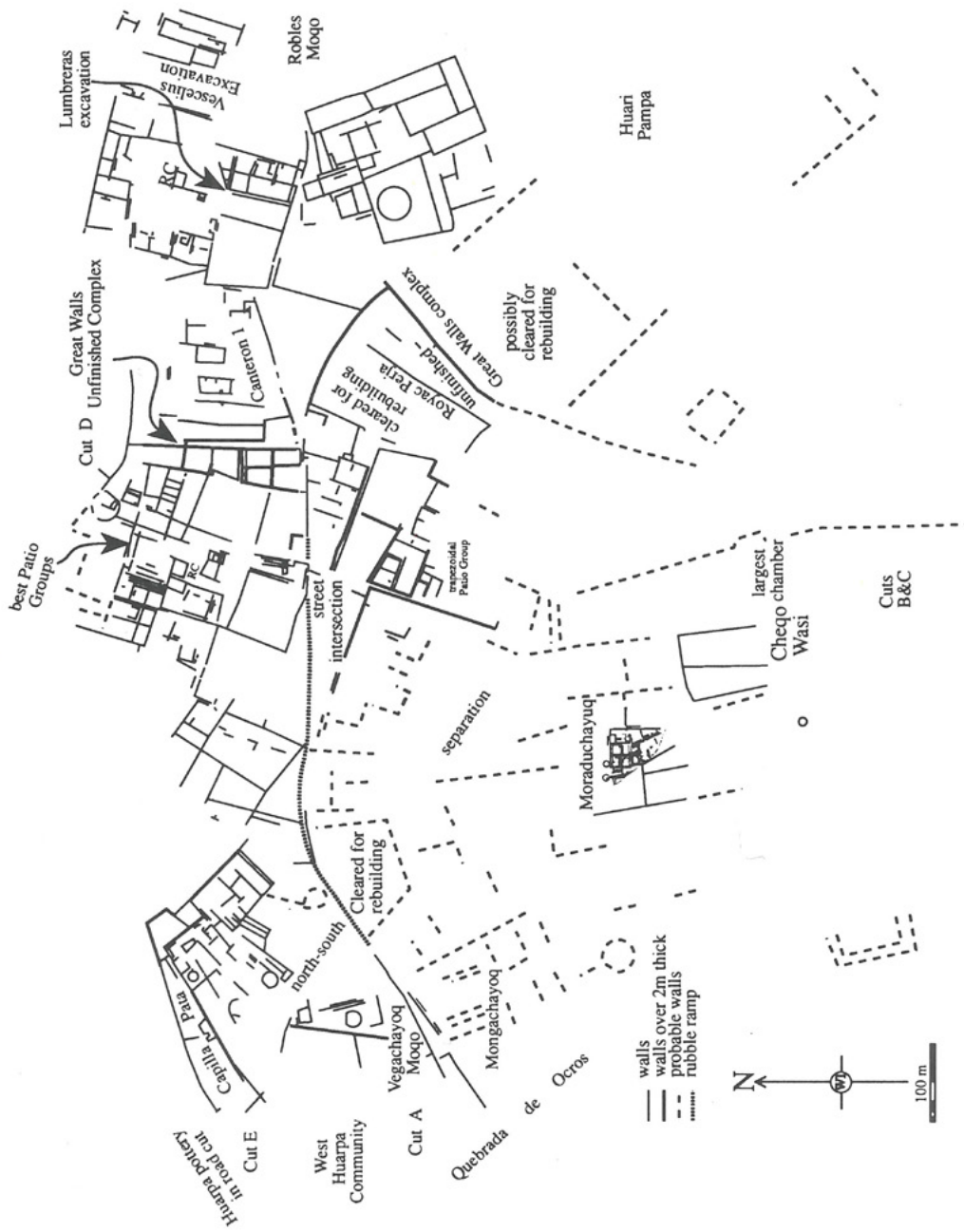


Figura 2. Mapa de Huari de William Isbell, Patricia Knobloch, y Katharina Schreiber, 1970. *Map of Huari by William Isbell, Patricia Knobloch, y Katharina Schreiber, 1970.*



Figura 3. Foto aérea de Huari tomada en 1970 por el Servicio Aerofotográfico Nacional de Perú.  
*Aerial photo of Huari taken in 1970 by the Servicio Aerofotográfico Nacional de Perú.*

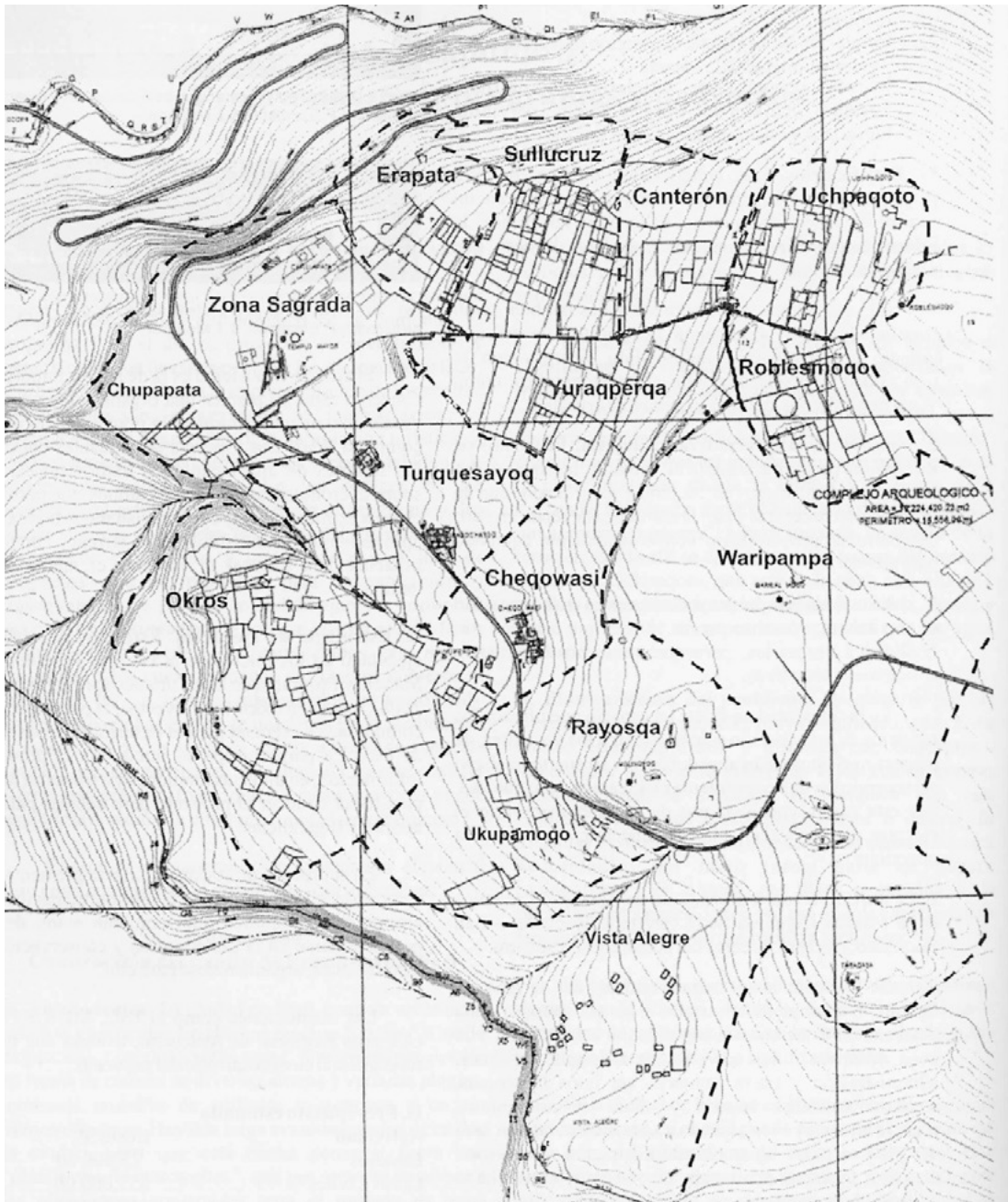


Figura 4. Mapa de Huari de Luis Lumbreras, 2007.

*Map of Huari by Luis Lumbreras in 2007.*



cubierta de cactus en Huari complican el levantamiento cartográfico en el campo, de modo que quedaron varias áreas sin registrar en el plano de 1974, y contiene imprecisiones internas. Desafortunadamente, la cobertura de plantas espinosas se ha vuelto aún más densa a través de los años subsecuentes en algunas áreas (Figura 5). Las fotos aéreas de 1970 utilizadas para ambos mapas proporcionan una vista panorámica del sitio, pero la resolución espacial no es alta, sino ligeramente de menos de un metro. Solo las paredes más grandes de Huari se pueden distinguir con claridad en las imágenes, y la imagen compuesta de la ciudad creada por las fotos aéreas no está georreferenciada ni corregida por distorsión. Estos mapas, las fotos aéreas y las fotos anteriores de otras fuentes son recursos críticos como archivo visual del estado de conservación, del uso y cobertura del terreno de Huari en el pasado reciente. Sin embargo, la comunidad de investigación beneficiaría de imágenes más precisas y de mayor resolución de la ciudad.

Las imágenes satelitales son una nueva e importante fuente de información para Ayacucho. Algunas de las mejores imágenes disponibles, como Worldview 3, proporcionan una resolución de 30 cm, y algunas de ellas están expuestas en el espectro visible en Google Earth. La compra de estas imágenes permite agudizar ligeramente las imágenes, pero muchas paredes y otros detalles arquitectónicos quedan borrosos o indetectables aun a esta resolución. Con las resoluciones actualmente disponibles, las imágenes satelitales y los modelos digitales de elevación creados a partir de ellas son ideales para proporcionar una contextualización regional de asentamientos como Huari, pero para fines de levantamiento de planos detallados a la escala del sitio, se requieren imágenes más detalladas. En la práctica, la única forma de obtener esta imagen es volar más cerca de la superficie. Esta tarea, anteriormente realizada por avión, helicóptero, globo y cometa, ahora se lleva a cabo de forma mucho más eficiente y efectiva gracias a aviones no tripulados, o conocidos más simplemente como drones. Un proyecto de documentación basado en drones puede crear un modelo ortomosaico y 3D de resolución inferior a 5 cm de Huari que, entre sus muchos usos, podría utilizarse con la verificación en tierra para hacer un mapa base SIG detallado fundado en vectores e inventariar las prácticas actuales de uso de terreno en el sitio. Otros investigadores, como Luis Jaime Castillo, ya han sobrevolado partes del sitio. En 2017, tratamos de ampliar este trabajo anterior de drones (Figura 6).

Hacemos hincapié en que las imágenes basadas en drones, como las fotografías aéreas y las imágenes satelitales, no son mapas. Un mapa es una representación de características seleccionadas de un lugar (Bertram 2021). Las imágenes brindan información a quienes construyen mapas, por ejemplo, trazando sobre paredes y otras características de interés. El cartógrafo toma decisiones sobre qué dibujar -¿Debería llamarse muro a esta alineación de rocas? ¿Deben incluirse o eliminarse las construcciones modernas?- y sobre la mejor manera de mitigar la distorsión y la imprecisión. La verificación en el terreno también es necesaria para confirmar la relación entre lo que se percibe en las imágenes y las características que el cartógrafo busca representar.

En Huari, la proliferación de límites de campo, terrazas y corrales modernos requiere una verificación sistemática del terreno; de hecho, es casi seguro que algunos mapas interpretan construcciones recientes como restos arqueológicos. Por supuesto, las características arqueológicas hipotéticas requieren verificación del terreno. Las imágenes georreferenciadas de mayor resolución disponibles a través de nuestro proyecto hacen posible crear mapas más precisos de las características tanto confirmadas como hipotéticas, y la plataforma de acceso abierto permite a los investigadores ver algunos de los datos subyacentes utilizados en la creación de mapas y actualizar la plataforma a medida que avanzan. Por lo tanto, vemos los productos basados en imágenes que resultaron de nuestro estudio como conjuntos de datos intermedios al servicio de un proyecto de mapeo más largo (de ahí el título de nuestro proyecto The Huari Mapping Project).

### **El Proyecto del Campo**

Antes de comenzar nuestro trabajo en Huari en 2017, confirmamos los límites del núcleo arquitectónico de Huari y la dispersión de artefactos periféricos con José Ochatoma y William Isbell. Acordamos utilizar el mapa de Lumbreras para designar los límites aproximados del sitio, y luego identificamos dónde se encontraban estos límites en las imágenes satelitales de alta resolución (Figura 7). Nuestro plan óptimo para los cinco días de fotoregistro disponibles fue dividir el área completa en diez polígonos, cada uno anclado por docenas de puntos de control terrestres visibles desde el aire, que se ubicaran de manera precisa a través de un GPS diferencial con una precisión de subcentímetro. Luego, diseñaríamos rutas de vuelo



Figura 5. Cubierta de cactus en Huari en 2017 (Pass 22).

*Cactus cover in Huari in 2017 (Pass 22).*





Figura 6. Volando el dron en Huari en 2017.

*Drone Flight in Huari in 2017.*

de drones dentro de cada uno de estos polígonos para garantizar una cobertura completa del sitio. Se tomarían fotografías en estas rutas de vuelo utilizando una cámara integrada de 12 a 20 megapíxeles con el objetivo de lograr una precisión de ~3 cm en los ortomosaicos de alta resolución, el modelo de elevación digital y modelos 3D resultantes. También se usaría una cámara térmica en áreas de alta cobertura de cactus con la esperanza de definir mejor las paredes, y se usaría una fotogrametría con base en tierra para “ver” debajo de los techos de metal que cubren parte de la arquitectura permanente del sitio (más sobre el trabajo térmico y terrestre posterior).

Debido al corto plazo de nuestro proyecto, no se pudo realizar este plan óptimo. Pero en otro sentido, el proyecto que realizamos sirve como prueba de concepto de la documentación detallada de un sitio extensivo y complejo en menos de una semana. Ejecutamos el proyecto con tres drones: un dron de alta precisión de la empresa Skycatch, un DJI Phantom 4 Pro, y un DJI Inspire 1. Vuelos adicionales en noviembre de

2017 nos permitieron fotografiar las partes del sitio que no pudimos cubrir en julio. El resultado final fue más de dos kilómetros cuadrados de cobertura, un área que encapsula todas las paredes existentes de Huari (Figura 8). Aunque es menor que la cobertura prevista, esta área aún es sustancialmente más grande que el área previamente volada en el sitio y a una resolución más alta que la obtenida anteriormente.

Las limitaciones de tiempo y también los problemas de permisos restringieron la cantidad de datos térmicos recopilados. Estos fueron especialmente importantes en las áreas de cobertura densa de cactus (Figura 9). La cámara térmica captura la luz infrarroja, de modo que las características más calientes aparecen más claras en la imagen, mientras que las más frías son más oscuras (Casana et al. 2014; Williams 2018). La esperanza de usar la cámara térmica era que las paredes de Huari tendrían una temperatura diferente a la flora circundante, especialmente en la noche cuando los muros de piedra retendrían el calor del día por más tiempo que los cactus circundantes.

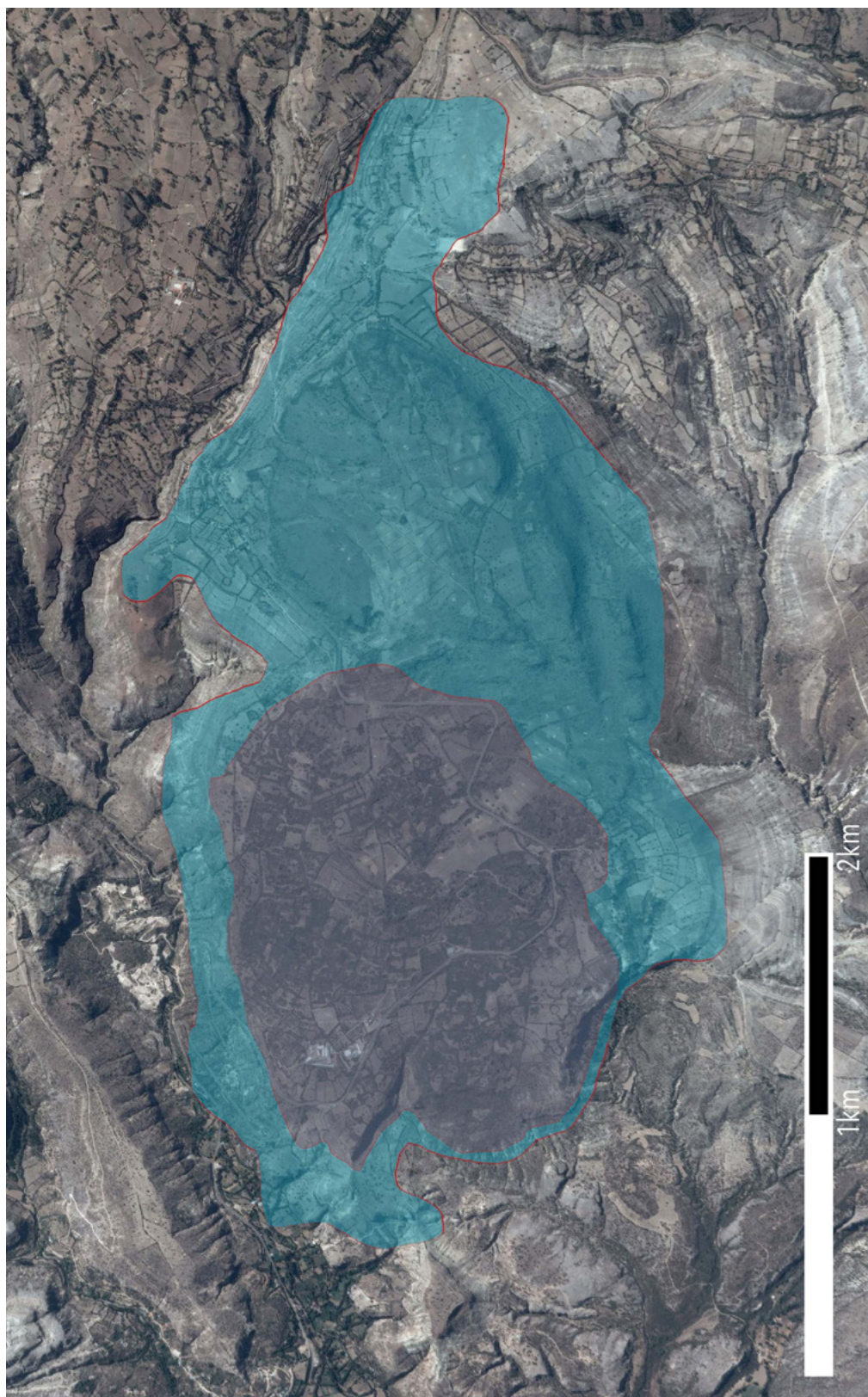


Figura 7. Los límites del núcleo arquitectónico de Huari (en gris) y la dispersión de artefactos periféricos (en azul) basado en Lumbreras (2010).

*The limits of the architectural nucleus of Huari (in grey) and the peripheral dispersion of ceramics (in blue) based on Lumbreras (2010).*



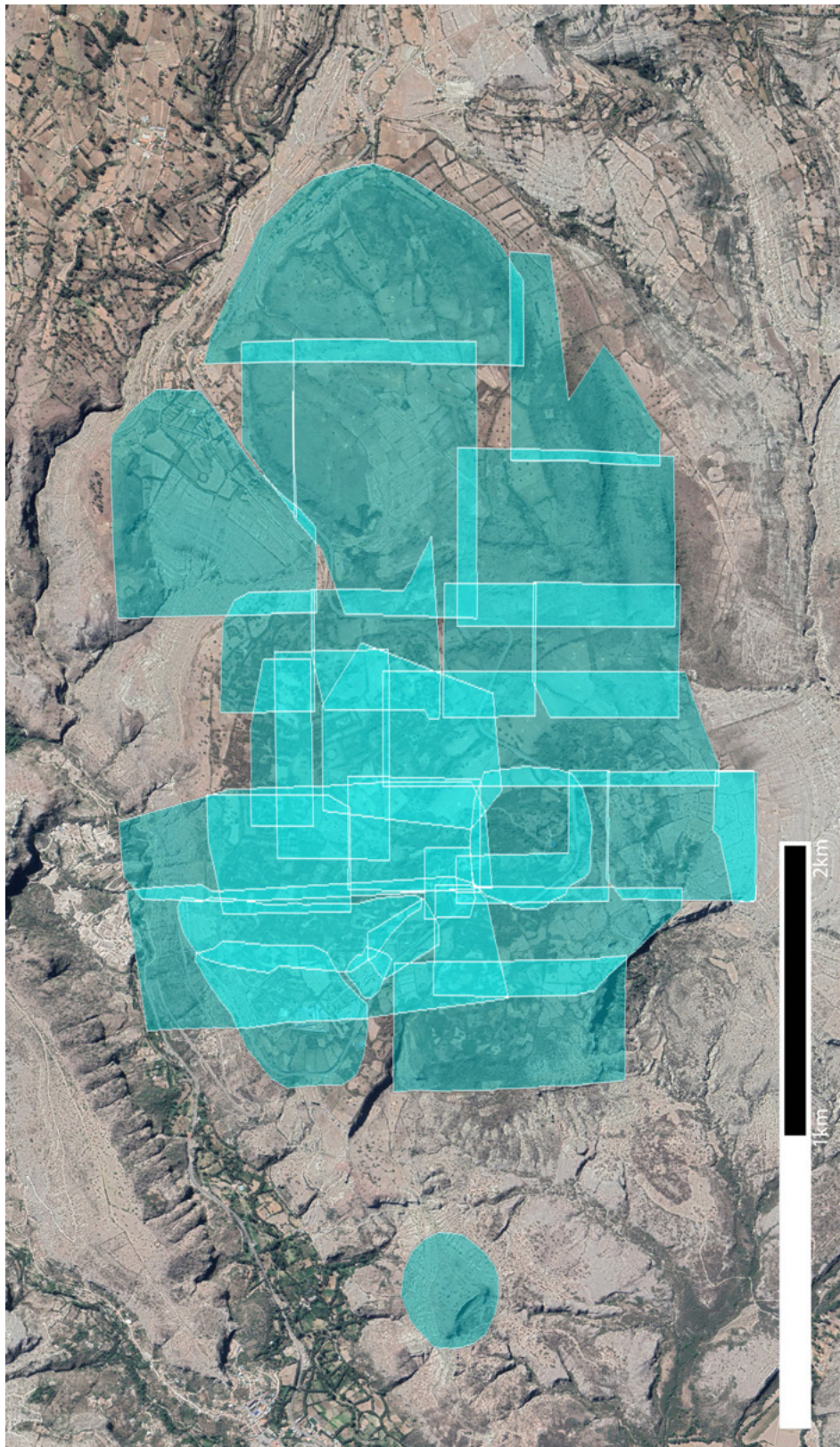


Figura 8. El área de imágenes optical de vuelos de 2017.  
*The area of optical image flights in 2017.*



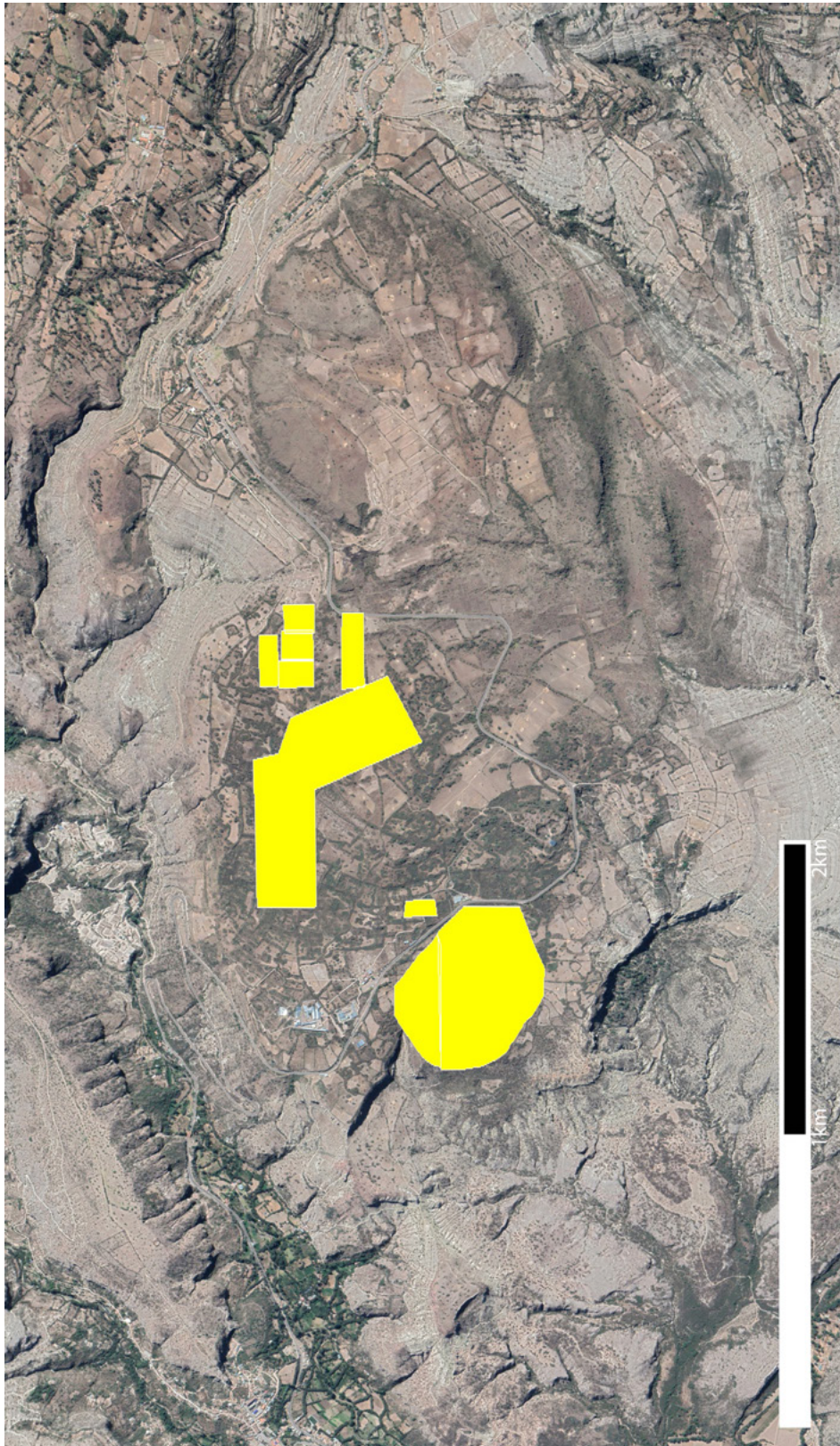


Figura 9. El área de imágenes termal de vuelos de 2017.

*The area of thermal image flights in 2017.*



Este fue de hecho el caso, y estas imágenes deberían ayudarnos a mapear muros junto con las imágenes de las cámaras normales. Afortunadamente, pudimos sobrevolar una parte significativa del área cubierta de cactus en el sitio (Figura 10).

La fotogrametría terrestre se limitó a las pocas áreas al oeste del museo del sitio donde teníamos permiso para tomar fotografías en 2017. La más importante de estas áreas fue Cheqo Huasi, un sector de tumbas de piedra de élite que ahora está cubierta en gran parte por techos de metal. Tomamos cientos de fotos del área debajo de los techos, usando una cámara montada en un poste para capturar la parte superior de las paredes. El procesamiento posterior de estas imágenes con Agisoft Metashape Pro (analizaremos este procesamiento en mayor detalle en la siguiente sección) nos permitió crear una imagen ortomosaica georreferenciada del aspecto que tiene Cheqo Huasi debajo del techo. Colocar esta imagen en capas superiores de las imágenes de los drones nos permite “eliminar” los techos de metal del Cheqo Huasi, lo que proporciona una mejor idea de cómo se organizó esta parte de la ciudad (Figura 11).

### **Procesando y Organizando las Imágenes de Huari**

La mayoría del procesamiento fotogramétrico de las imágenes de drones se realizó con Photoscan (ahora Agisoft Metashape Pro), uno de los programas comerciales más avanzados en la industria para la creación de modelos 3D, mosaicos de imágenes ortorectificadas y modelos digitales de elevación a partir de imágenes superpuestas. En el caso de los vuelos del dron Skycatch, el procesamiento se realizó utilizando su sistema en línea para producir ortomosaicos, modelos digitales de superficie, y nubes de puntos. Es importante señalar, sin embargo, que las opciones libres y abiertas como Open Drone Map ([opendronemap.org](http://opendronemap.org)) han mejorado mucho entre 2017 y ahora, y se puede producir resultados muy comparables.

Los pasos en el proceso de trabajo fotogramétrico con Metashape incluyen la selección de lotes de imágenes superpuestas, alineación, geolocalización y ortorectificación de las imágenes aéreas, seguido de la exportación a varios formatos 2D y 3D. El primer paso, la selección de lotes de imágenes, es importante y, a menudo, consume más tiempo en el proceso de trabajo. Esto fue especialmente así en nuestro caso debido a la escala y complejidad del proyecto de mapeo Huari, con más de 20 misiones

automáticas distintas y parcialmente superpuestas de drones. Sin embargo, una vez que se selecciona una serie de imágenes, el trabajo del procesamiento de imágenes es bastante sencillo (Figura 12). El programa Agisoft Metashape Pro detecta automáticamente los parámetros de la cámara del dron a partir de los geodatos de la imagen. La alineación de imágenes es automatizada. Durante este proceso, el programa identifica de manera automática puntos comunes entre imágenes en función del valor de píxel de cada imagen. Desde estas múltiples perspectivas de puntos comunes, se reconstruye la estereoscopia (y por lo tanto la tridimensionalidad). Agisoft primero realiza una alineación de imagen inicial y genera una nube de puntos dispersos. Este resultado se revisa brevemente antes de la generación mucho más computacional de una nube de puntos densos y una malla 3D (Figura 13, ver también <https://youtu.be/qEEVNedloM0>).

La exactitud horizontal y vertical depende de la precisión posicional del GPS a bordo del avión no tripulado (el cual escribe la posición de la cámara en cada imagen en forma de geoetiquetas), o la precisión de los puntos de control de tierra. Estos puntos de control en tierra eran por lo general puntos fijos claramente visibles desde el aire, como los botes circulares de basura que se encuentran en las rutas turísticas a través del sitio. La mayor precisión se logra mediante el levantamiento de la tierra de los puntos de control del terreno, marcados en el campo por los objetivos visibles en las imágenes. Dada la escala y las limitaciones de tiempo de este proyecto, no pudimos establecer una red de puntos de control terrestre en la totalidad del sitio. Por lo tanto, nuestro trabajo de procesamiento deriva la ubicación del modelo desde el GPS a bordo. La precisión absoluta de estos receptores GPS es de unos 4 m. Por lo tanto, cada misión de avión no tripulado flota independientemente con un error aproximado de 4 m. Sin embargo, la precisión relativa dentro de cada modelo es considerablemente mayor porque la precisión interna está más relacionada con la eliminación de la distorsión de la lente de la cámara. Debido a que el programa conoce los parámetros de la lente de la cámara, estas distorsiones se eliminan de manera efectiva. En el caso de los cuatro vuelos del dron Skycatch, los resultantes ortomosaicos y modelos digitales de terreno tienen una precisión absoluta de 3-4 cm los ejes horizontales, y 10 cm en el eje vertical. Después de la generación de la nube de puntos densos y el modelo de malla 3D, también se puede generar una textura fotorrealista (derivada de



Figura 10. Comparación de imágenes ópticas frente a imágenes térmicas de la misma ubicación en Huari.  
*Comparison of optical and thermal image in the same location at Huari.*





Figura 11. El uso de fotogrametría terrestre para “eliminar” los techos sobre Cheqo Huasi en Huari. De izquierda a derecha, techo como se encuentra in situ, ortomosaicos fotogramétricos de la arquitectura debajo y una superposición de dibujos de excavación originales para clarificar la organización espacial (Benavides 1991, Figura 2 ¿de Benavides?).  
 The use of photogrammetry to “eliminate” the roofs on top of Cheqo Huasi in Huari. From left to right, the roof as it looks in situ, orthomosaic photographs of the architecture underneath, and the superposition of original excavation drawings to clarify spatial organization (after Benavides 1991, Figure 2).



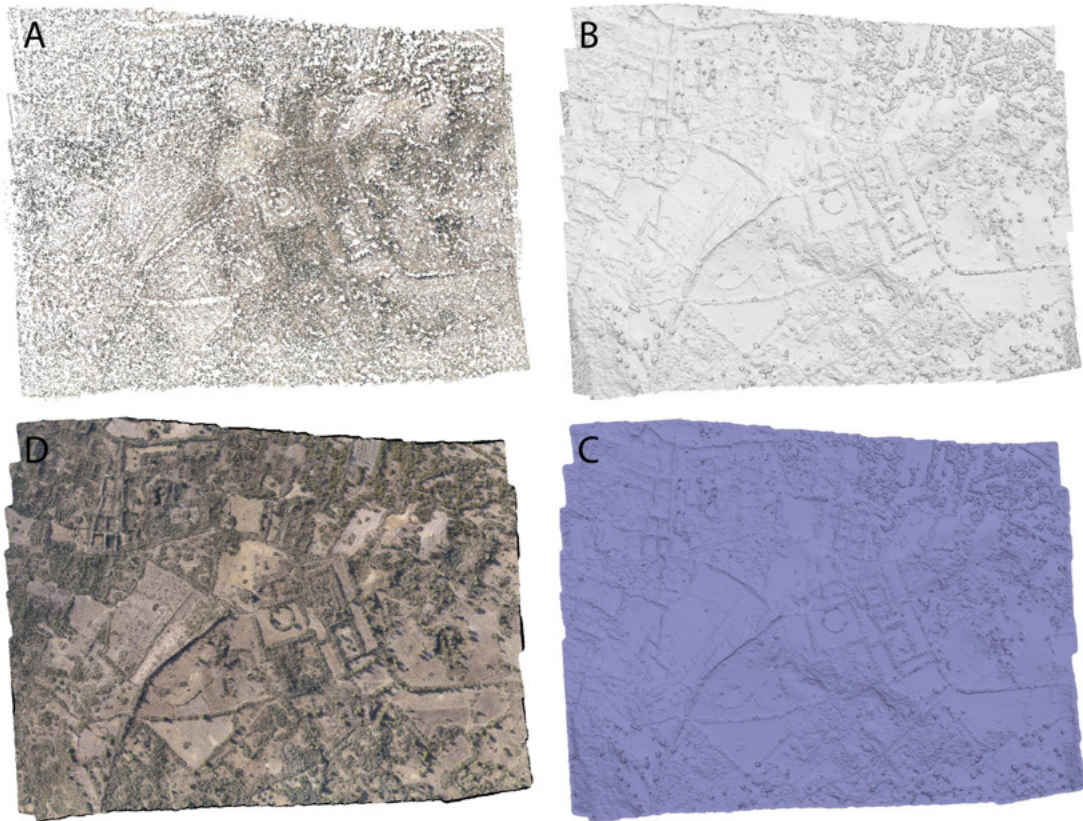


Figura 12. Pasos en el proceso de creación de un modelo fotogramétrico, utilizando el Paso 4 del sector Capillapata, en el sentido de las agujas del reloj desde la parte superior izquierda: (A) Nube de puntos dispersa inicial a partir de la alineación de la imagen; (B) Nube de puntos densa por interpolación; (C) Superficie de malla triangulada; (D) Textura fotorrealista superpuesta sobre malla.

*Steps in the process of created a photogrammetric model, using Pass 4 of the Capillapata Sector, clockwise from upperleft: (A) Dispersed point cloud to align image; (B) Dense point cloud for interpolation; (C) Triangular mesh surface, and (D) photorealistic texture superimposed on the mesh.*

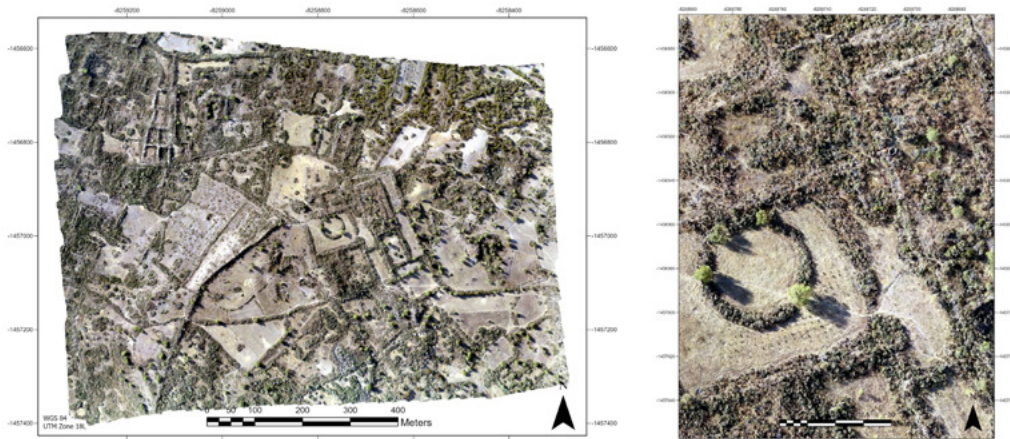


Figura 13. Imágenes ortorectificadas y georreferenciadas del sector Capillapata, mostrando el Paso 4 (izquierda) y detalles del Paso 4 (derecha).

*Orthorectified and georeferenced images of the Capillapata Sector, demonstrated in Pass 4 (left) and detail of Pass 4 (right).*



una representación compuesta del fotomosaico) para superposición sobre la malla. Por último, el programa genera un mosaico ortorectificado (ortomosaico) y un modelo de elevación digital planimétricamente correcto (Figura 14). Estos se pueden exportar en varios formatos (todos georreferenciados). Hemos exportado todos los ortomosaicos producidos y el modelo de elevación digital en formato geotiff, que automáticamente genera en mosaico estas imágenes muy grandes para mejorar el rendimiento de renderizado (ver <https://youtu.be/arnng4gWCg48>).

### El Proyecto de Mapeo Huari y Los Prospectos Futuros

Uno de los grandes desafíos de trabajar con datos espaciales es el desarrollo de plataformas a través de las cuales los usuarios puedan acceder fácilmente a las imágenes de una manera útil. El sitio web del Proyecto de Mapeo de Huari se desarrolló para

este fin: proporcionar acceso extensible y abierto a los datos de imágenes del sitio de Huari para la comunidad de investigación arqueológica. Nuestro objetivo era permitir que el usuario se pudiera vincular a los mosaicos de imágenes directamente a través de su SIG, o descargar las ortoimágenes también de manera directa. El sitio web compila ortomosaicos de luz visible e imágenes térmicas, así como modelos digitales de elevación en un mapa de base. El usuario puede navegar, acercar, etc., y hacer clic en un área de interés para ver qué imágenes correspondientes cubren la zona, junto con su enlace o dirección de descarga (Figura 15). También se puede acceder directamente a ellas a través de las imágenes miniaturas de muestreo y descripciones debajo del mapa general. Los usuarios pueden hacer clic en un área de interés y revisar aquellas que se encuentran bajo el cursor, las que también pueden ser accedidas directamente a través de miniaturas de cada trayectoria de vuelo del dron, y mediante descripciones hiperenlazadas

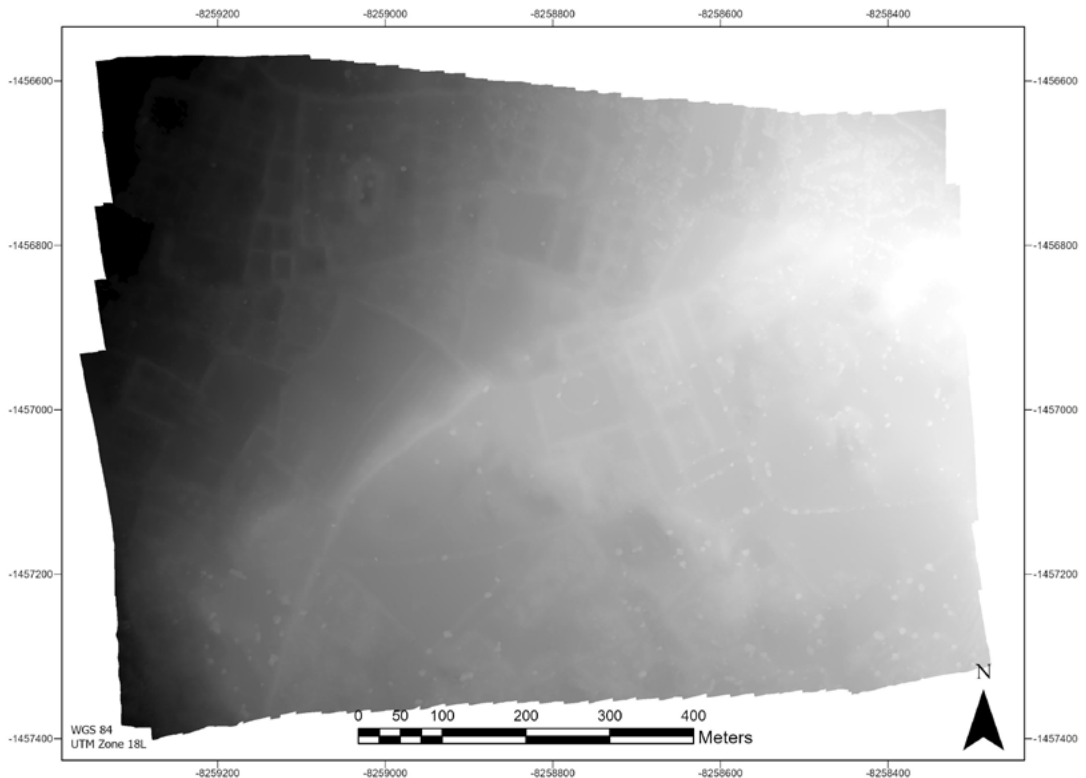


Figura 14. Detalle del modelo de elevación digital (DEM) ortorectificado y georreferenciado del Paso 4, que revela probables alineaciones arquitectónicas ocultas por la cubierta vegetal.

*Detail of the orthorectified and georeferenced digital elevation model of Pass 5 that reveals probable wall alignments obscured by vegetation cover.*



Figura 15. Plataforma digital para ortomosaicos de Huari disponible en <http://www.huarimappingproject.org>.

Digital platform for orthomosaics of Huari are available at <http://www.huarimappingproject.org>.

debajo del mapa de visión general. Se conectan a las imágenes en el mosaico mediante el URL en la página de descripción de cada imagen, o del URL que se muestra en la ventana emergente al hacer un clic derecho en el mapa general. Las instrucciones para conectar las imágenes a su tipo de proyecto SIG de escritorio se proporcionan en la parte inferior de la página y a través de un breve video (*gif* animado). Se realizarán actualizaciones futuras a medida que se procesen y publiquen nuevos datos, así como después de nuevas excavaciones (Figura 16) y cuando se expongan secciones techadas (Figura 17). Además, brindamos acceso a las fotos originales de cada vuelo sin procesar, lo que permitirá a los futuros usuarios reprocesar libremente cada misión a medida que el software fotogramétrico se desarrolle con el tiempo.

El sitio web fue elaborado con ArcGIS Hub, de la empresa ESRI. Los sitios de ArcGIS Hub proporcionan interfaces flexibles y personalizables para alojar datos abiertos y aplicaciones web de cara al público creadas con la suite ESRI ArcGIS. El sitio alberga ortomosaicos en mosaico de la cobertura de drones Huari 2017, que son de acceso público a través de una URL, también conocida como punto final REST (ver esta descripción del punto final REST: <https://enterprise.arcgis.com/en/server/10.8/publish-services/windows/introduction-to-geoprocessing-rest-services.htm>). Los usuarios pueden conectar los ortomosaicos en mosaico a proyectos de ArcGIS Online, ArcGIS Pro o QGIS a través del punto final REST.

Para compartir estos datos, se generaron ortoimágenes en mosaico en ArcGIS Pro y luego se publicaron en ArcGIS Server, cuando también se generó un punto final REST. Cada capa de mosaico cuenta con 18 niveles de zoom, con una visibilidad desde el nivel de país (1: 12.000.000) hasta el nivel de habitación (1: 100). Una vez que cada ortomosaico se publica en ArcGIS Server, se agrega como un elemento en ArcGIS Online. Se incluye una imagen de descripción general al elemento en ArcGIS Online, así como una breve descripción. A partir de aquí, se creó un sitio personalizado de ArcGIS Hub en ArcGIS online y todos los mosaicos de imágenes se agregaron como contenido público al Hub.

La principal limitación de ArcGIS Online desde el punto de vista de la producción y distribución de datos es que requiere el uso de créditos de ESRI, lo cual involucra recursos institucionales. Como institución educativa, la Universidad de Vanderbilt tiene créditos ilimitados, pero podría ser un obstáculo de costos para otros investigadores e instituciones. Se puede lograr semejante funcionalidad mediante herramientas de código abierto como GeoServer (<https://geoserver.org/>) y GeoNode (<https://geonode.org/>). El uso de esas plataformas, sin embargo, requiere un nivel técnico más alto para producir una aplicación web de funciones comparables.

La plataforma digital ya está activa en [www.huarimappingproject.org](http://www.huarimappingproject.org), con libre acceso a cualquier visitante. El valor de nuestra plataforma digital quizás se ilustra mejor al comparar imágenes individuales de la plataforma con sus áreas correspondientes en el mapa de Lumbreras de Huari publicado en 2007 (Figura 4). Como todo mapa, se trata de una abstracción, simplificada, en este caso, para mostrar los muros principales del sitio y los nombres



Figura 16. Captura de excavaciones posteriores. El ortomosaico de la izquierda muestra excavaciones en el sector Patipampa de Huari en 2017, las que ocurrieron durante nuestro proyecto de mapeo. El ortomosaico de la derecha muestra las excavaciones del sector Patipampa en 2018 que ocurrieron después de nuestro proyecto (ortomosaico de 2018 cortesía de William H. Isbell y el Programa Arqueológico Prehistoria Urbana de Huari).

*Documentation of previous excavations. The orthomosaic on the left shows excavation in the Patipampa sector of Huari in 2017 that occurred during our mapping project. The orthomosaic on the right show excavation in the Patipampa sector in 2018 that occurred after our project (2018 orthomosaic courtesy of William H. Isbell and the Programa Arqueológico Prehistoria Urbana de Huari).*





Figura 17. Techo de aluminio sobre la sección de Vegachayoq Moqo de Huari. Las imágenes de drones tomadas cuando se retiran los techos podrían agregarse a la plataforma digital.

*Aluminum roof over the Vegachayoq Moqo section of Huari. Drone footage taken when roofs are removed could be added to digital platform.*



de sus sectores. Las ortoimágenes georreferenciadas en nuestra base de datos se pueden utilizar para refinar la ubicación de los muros existentes en el mapa de 2007, así como para identificar muchos otros muros que no se incluyeron. Igual de importante es que las imágenes y los modelos que pueden derivarse de ellas pueden restaurar un sentido de lugar al ubicar estos muros dentro del paisaje ondulado de Huari y las plantas, senderos y granjas que se encuentran allí hoy.

Esperamos que esta plataforma digital Huari en línea sea de utilidad amplia para los arqueólogos, profesionales del patrimonio y, si lo desea, para el público general. Para los arqueólogos, la plataforma ofrece una herramienta crítica para el levantamiento más preciso y extenso de las estructuras precolombinas en Huari. Además, el modelo y el ortomosaico proporcionan los cimientos para una prospección a pie de cobertura completa de la ciudad. Para los profesionales del patrimonio, las imágenes entregan una visualización clara de la zona arqueológica de Huari y cómo su estado de conservación evoluciona a través del tiempo. Los cambios en la cobertura de cactus, la agricultura, las actividades de saqueo, los senderos y otras características podrían monitorearse con el tiempo para proteger el sitio y mejorar el turismo.

Es nuestro intento seguir nuestro trabajo y colaboración con el Ministerio de Cultura de Perú y el Departamento de Ayacucho con respecto a la disponibilidad de datos en fases futuras del proyecto, y podemos restringir el acceso o eliminar imágenes

según los deseos de las autoridades. A medida que se recopilan imágenes adicionales, se pueden agregar a la plataforma. También vale destacar que el proyecto conlleva impactos sobre el conocimiento del patrimonio regional. Huari es un punto importante del plan de desarrollo turístico de Ayacucho, y gran parte de la majestuosidad del sitio se puede apreciar mejor desde el aire. Brindar al público una forma de explorar digitalmente el complejo proporciona la oportunidad de aumentar de modo significativo el turismo nacional y extranjero en uno de los sitios más importantes del mundo precolombino.

*Agradecimientos:* Agradecemos la autorización y apoyo a este proyecto por parte del Ministerio de Cultura, Ayacucho y a su entonces directora, Lic. Luz Rosario Antonio Vargas. Muchas gracias a José Ochatoma y William Isbell por su espíritu colaborativo y apoyo durante el proceso de recopilación de datos. La producción de la plataforma web fue realizada por el Vanderbilt Institute for Spatial Research (VISR), utilizando recursos computacionales del Spatial Analysis Research Laboratory de Vanderbilt University. En el campo, el proyecto se benefició de los esfuerzos vitales de los licenciados Patricia Quiñonez, Lic. Yoni Pumacahua y María Zamora Melo.

Agradecemos a dos grupos de revisores anónimos por sus comentarios que mejoraron este artículo, así como a Eugenia Rosello Ninancuro por guiarnos a través del proceso editorial. Dedicamos este artículo a Luis Lumbreras, un gigante de la arqueología Wari.

## Referencias Citadas

- Bennett, W. 1953. *Excavations at Wari, Ayacucho, Peru*. Yale University Press, New Haven.
- Benavides, M. 1991. Cheqo Wasi, Huari. En *Huari Administrative Structure: Prehistoric Monumental Architecture and State Government*, editado por W. Isbell y G. McEwan, pp. 55-69. *Dumbarton Oaks*, Washington D.C.
- Bertram, B. 2021. *Thinking with Maps: Understanding the World through Spatialization*. Rowman & Littlefield, Lanham.
- Cabrera Romero, M. y J. Ochatoma Paravicino 2019. Arquitectura funeraria y ritual en el sector de Monqachayuq, Wari. *Research Papers of the Anthropological Institute* 8:46-92.
- Cabrera Romero, M., J. Ochatoma Paravicino y Y. Vega Suarez 2021a. Evidencias de ocupación Huarpa en Vegachayuq Moqo – Wari: análisis estilístico de la cerámica. En *Wari: Nuevos Aportes y Perspectivas*, editado por J. Ochatoma Paravicino y M. Cabrera Romero, pp. 47-74. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho.
- Cabrera Romero, M., J. Ochatoma Paravicino y J. Ochatoma Cabrera 2021b. El mausoleo real de Monqachayuq: un ejemplo de la arquitectura funeraria del poder en Wari. En *Wari: Nuevos Aportes y Perspectivas*, editado por J. Ochatoma y M. Cabrera, pp. 21-46. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho.
- Casana, J., J. Kantner, A. Wiewei y J. Cothren 2014. Archaeological aerial thermography: A case study at the Chaco-era Blue J community, New Mexico. *Journal of Archaeological Science* 45:207-219.
- Castillo, L.J., F. Serván y K. Patroni 2019. Documenting archaeological sites on mountains and slopes with drones. *Advances in Archaeological Practice* 7 (4):337-352.
- Fritz, C. y G. Tosello 2007. The Hidden meaning of forms: Methods of recording Paleolithic parietal art. *Journal of Archaeological Method and Theory* 14 (1):48-80.
- Isbell, W.H., C. Brewster-Wray y L. Spickard 1991. Architecture and spatial organization at Huari. En *Huari Administrative*

- Structures*, editado por W. Isbell y G. McEwan, pp. 19-54. Dumbarton Oaks, Washington D.C.
- Lumbreras, L. 2010. *Plan de Manejo y Programa de Uso Turístico del Complejo Arqueológico de Wari*. Gobierno Regional de Ayacucho, Plan Copesco Nacional, Ayacucho.
- MacNeish, R., A. García Cook, L. Lumbreras, R.K. Vierra y A. Nelken-Terner 1982. *Prehistory of the Ayacucho Basin, Peru. Volume II: Excavations and Chronology*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Ochatoma Paravicino, J., M. Cabrera Romero e I. Miranda Vega 2021. Estudio de un contexto cerámico temprano en el sector 2 de Vegachayuq Moqo-Wari. En *Wari: Nuevos Aportes y Perspectivas*, editado por J. Ochatoma Paravicino y M. Cabrera Romero, pp. 75-109. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho.
- Ochatoma Paravicino, J., C. Mancilla Rojas y M. Cabrera Romero 2015. *El Área Sagrada de Wari: Investigaciones Arqueológicas en Vegachayuq Moqu*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho.
- Pérez Calderón, I. 1999. *Huari: Misteriosa Ciudad de Piedra*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho.
- Pérez Calderón, I. 2001. Investigaciones en la periferia del complejo Huari. *XII Congreso Peruano del Hombre y la Cultura Andina "Luis G. Lumbreras"*, editado por I. Pérez Calderón, W. Aguilar y M. Purizaga, pp. 246-270. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho.
- Pérez Calderón, I. 2017. *Canteras, Cuevas, Acueductos y Caminos Conectados a la Metrópoli Wari*. Editorial Académica Española, Saarbrücken.
- Pierdicca, R., E. Frontoni, E.S. Malinverni, F. Colosi y R. Orazi 2016. Virtual reconstruction of archaeological heritage using a combination of photogrammetric techniques: Huaca Arco Iris, Chan Chan, Peru. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 3:80-90.
- Tello, J.C. 1942. *Origen y Desarrollo de las Civilizaciones Prehistóricas Andinas*. Librería e Imprenta Gil S.A., Lima.
- Tello, J.C. 2009 [1931]. The ruins of Wari. En *The Life and Writings of Julio C. Tello: America's First Indigenous Archaeologist*, editado por R.L. Burger, pp. 275-278. University of Iowa Press, Iowa City.
- Valdez, L.M. y J.E. Valdez 2017. From rural to urban: Archaeological research in the periphery of Huari, Ayacucho Valley, Peru. *Journal of Anthropology* 3:3597297. <https://doi.org/10.1155/2017/3597297>
- Wernke, S.A., C. Hernández, G. Marcone, G. Oré, A. Rodríguez y A. Traslaviña 2016. Beyond the basemap: Multiscalar survey through aerial photogrammetry in the Andes. En *Mobilizing the Past for a Digital Future: The Potential of Digital Archaeology*, editado por E. Walcek Averett, J. Gordon y D.B. Counts, pp. 251-278. The Digital Press/University of North Dakota, Grand Forks.
- Wernke, S., L. Kohut y A. Traslaviña 2017. A GIS of affordances: Movement and visibility at a planned colonial town in highland Peru. *Journal of Archaeological Science* 84:22-39.
- Williams, P.R., A.C. Londoño y M. Hart 2018. Modeling archaeological landscape transformations in early Andean empires. En *New Geospatial Approaches in the Anthropological Sciences*, editado por R. Anemone y G. Conroy, pp. 189-209. University of New Mexico Press, Albuquerque.