

FOTOGRAMETRÍA, MODELAMIENTO TRIDIMENSIONAL Y DRONES EN ARQUEOLOGÍA

Segunda parte Documentación, registro y modelamiento fotogramétrico de sitios arqueológicos

Luis Jaime Castillo Butters^a y Héctor Barrera Yaranga^b

Resumen

La segunda parte de este artículo se centra en el proceso de modelamiento fotogramétrico tridimensional aplicado a sitios arqueológicos. Después de una discusión acerca de las tres fases de la documentación fotogramétrica, con o sin drones, que incluyen la planificación, el registro y el procesamiento, discutimos seis estrategias de registro de sitios determinadas por las capacidades de los equipos, las características de los sitios que se modelan y su entorno geográfico y topográfico. Estas estrategias se basan en la documentación de más de mil sitios en todo el Perú y en las diferentes necesidades de los registros en términos de los productos que se buscaban generar.

Palabras clave: modelamiento 3D, fotogrametría, drones en arqueología, estrategias de registro, documentación de sitios arqueológicos.

PHOTOGRAMMETRY, 3-D MODELLING AND DRONES IN ARCHAEOLOGY. PART 2. THE PHOTOGRAMMETRIC DOCUMENTATION, RECORDING AND MODELLING OF ARCHAEOLOGICAL SITES

Abstract

The second part of this paper focuses on the process of 3-D photogrammetric modelling applied to archaeological sites. A discussion of the three phases—planning, recording and processing—of drone and drone-less photogrammetric documentation, is followed by a review of six site-recording strategies as determined by the capacities of the equipment used, the characteristics of the sites that are being modelled, and their geographical and topographic setting. These strategies are based on the documentation of over a thousand sites in all Peru, as well as on the various recording requirements in terms of the desired outputs.

Keywords: 3D modeling, photogrammetry, drones in archaeology, recording strategies, documentation of archaeological sites.

^a Programa Arqueológico San José de Moro, Departamento de Humanidades, Pontificia Universidad Católica del Perú. lcastil@pucp.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0003-3599-7536b>

^b Programa Arqueológico San José de Moro, Departamento de Humanidades, Pontificia Universidad Católica del Perú. hbarrera@pucp.edu.pe
<https://orcid.org/0009-0001-7484-026X>



1. EL MODELAMIENTO TRIDIMENSIONAL FOTOGRAMÉTRICO DE SITIOS ARQUEOLÓGICOS

En la segunda parte de este artículo se presentan seis tipos de registro y documentación de sitios arqueológicos con el uso de drones, así como su posterior modelamiento fotogramétrico tridimensional. Mediante ejemplos prácticos, se ilustrará cómo estos métodos fueron aplicados. Debemos precisar que estos tipos de registro y documentación son fruto de nuestras múltiples experiencias acumuladas en los últimos once años en todas las regiones del Perú, desde la exploración de sitios ubicados en el litoral, hasta aquellos que superan los 5000 metros sobre el nivel del mar (desiertos, montañas, punas y ambientes tropicales), así como de las experiencias compartidas por diferentes investigadores en artículos de corte metodológico (*v.g.*, Al-Ruzoug y Dabous 2017; Castillo 2018; Castillo *et al.* 2019a, 2019b, 2020; Galassi *et al.* 2022; Harrower *et al.* 2014; Jalandoni y May 2020; Martínez-Carricondo *et al.* 2020; Masson-MacLean 2021; O'Driscoll 2019; Olson *et al.* 2013; Roosevelt 2014; Sapirstein 2016; Scott *et al.* 2021; Šedina *et al.* 2019; Van Valkenburgh *et al.* 2020; Wernke *et al.* 2017).

Los tipos de documentación que se presentan aquí combinan vuelos asistidos por programas de planificación de vuelo o autopilotos que, como hemos visto, controlan todos los parámetros del vuelo (altura, velocidad, área de registro, ángulo de inclinación de la cámara, superposición frontal y lateral de las imágenes, etcétera) y se definen con antelación al vuelo mismo. También utilizamos los vuelos *libres*, es decir, vuelos en los que los aparatos están bajo el control absoluto del piloto y donde no interviene ningún programa. Estos, generalmente, corresponden a lo que hemos llamado vuelos en *coronas* o *cinturones* (ver Castillo Butters y Barrera Yaranga 2024).

Es importante resaltar que es necesario que los métodos de registro se adapten a las características de lo que se quiere documentar. Como hemos indicado, existen cuatro categorías de sujetos de representación: los artefactos, los contextos, los sitios y las regiones. Los métodos que se emplean para documentar cada uno de ellos son muy diferentes. Mientras que en los dos primeros el registro se hace, prioritariamente, con cámaras fotográficas o escáneres láser de superficie, en los otros dos: la documentación de sitios y la prospección arqueológica, generalmente se emplean drones equipados con cámaras. Otras diferencias están relacionadas con la densidad de las imágenes, es decir, cuántas imágenes se toman para documentar un objeto o contexto y la resolución de estas, que suele ser lo más alta posible, así como la georreferenciación de los productos en 2D y 3D que se obtienen mediante el proceso fotogramétrico.

Esta segunda parte, como se indicó previamente, está enfocada en la documentación y en el modelamiento de sitios arqueológicos. Por la diversidad de sitios y sus diferencias de tamaño y complejidad, su registro puede ser uno de los más complejos en el modelamiento tridimensional fotogramétrico. La complejidad de los vuelos de registro de sitios dependerá de muchos factores, como las características y extensión de los sitios; la complejidad de sus componentes naturales y construidos; la altura y distancia entre el punto de despegue y el sitio; y la calidad, resolución y detalle que se quiera obtener, tanto del modelo como de los productos derivados. En términos generales, la documentación de sitios arqueológicos comprende tres fases sucesivas de registro que determinan los tipos de documentación que se proponen a continuación.

Fase 1. En primer lugar, es indispensable crear un mosaico de imágenes cenitales. Esto se realizará mediante un vuelo de dron controlado por un programa de autopiloto (ver Castillo Butters y Barrera Yaranga 2024: Figs. 11 y 12). Luego, estas imágenes permitirán generar ortofotografías y otros productos bidimensionales cuyo principal propósito es ubicar todos los elementos en función del terreno. Asimismo, los mosaicos generan relieves y volúmenes básicos que pueden ser perfeccionados con imágenes oblicuas. De esta forma, los mosaicos tendrán mayor o menor resolución y, consecuentemente, calidad. Se debe precisar que la calidad depende de dos factores: de la altura del vuelo, que determina la resolución de las imágenes, y, en última instancia, del modelo, tanto la superposición (*overlap*) frontal como lateral de las imágenes. La creación de un mosaico

de imágenes cenitales es una práctica común y necesaria para casi todo tipo y método de registro de sitios, ya sea que este mosaico se obtenga mediante el uso de un programa de autopiloto o que se haga a mano, es decir, con el piloto en control del vuelo y sin la ayuda de ningún programa. Ahora bien, los tipos 1 y 5 de documentación de sitios, que se presentan en este artículo, se basan en registros que solo se realizan con mosaicos de imágenes cenitales.

Fase 2. En segundo lugar, las imágenes cenitales deben ser complementadas con imágenes oblicuas, lo que se denomina aquí como *cinturones* y *coronas*, que permitirán enfatizar los aspectos verticales del sujeto. Por ello, es imprescindible que las coronas de imágenes oblicuas rodeen íntegramente al sitio, y, si es necesario, que rodeen también a algunos de sus componentes que presenten aspectos verticales relevantes. Adicionalmente, es necesario que se realicen múltiples coronas, progresivamente más altas y con el ángulo de la cámara enfocado hacia el elemento que se está registrando con el fin de conseguir que estas imágenes cumplan con el criterio de superposición. Al final, las sucesivas coronas definirán una cúpula de imágenes sobre el sujeto de representación. Ahora bien, es necesario distinguir dos tipos de coronas: las coronas generales, que se hacen alrededor de todo el sitio, y las coronas puntuales, más pequeñas, que se realizan alrededor de los componentes arquitectónicos menores. En conjunto, los mosaicos de imágenes cenitales y las fotos oblicuas generarán modelos muy precisos y detallados que permitirán mostrar las formas generales del sitio y sus componentes, mas no así los detalles decorativos de estos. La combinación de mosaicos de imágenes cenitales y cinturones, generales y puntuales, de imágenes oblicuas caracterizan los tipos 2 y 3 de registro de sitios arqueológicos (ver más adelante).

Fase 3. En tercer lugar, y dependiendo de las características de los sitios y el detalle que se requiera obtener de la documentación, las imágenes cenitales y oblicuas deben complementarse con imágenes adicionales. Estas pueden ser de menor altura, de ángulos más marcados, de gran acercamiento, o imágenes tomadas desde muy corta distancia y preferentemente desde la superficie. Las cámaras fotográficas deben enfatizar desde muy cerca los detalles decorativos y arquitectónicos, o registrar espacios a los que los drones no pueden acceder. La inclusión de imágenes adicionales distingue los tipos 4 y 6 de las otras modalidades de registro y modelamiento.

2. LAS FASES DEL MODELAMIENTO: PLANIFICACIÓN, REGISTRO, Y PROCESAMIENTO

En términos generales, todo registro y documentación de un sujeto arqueológico se realiza en tres fases. En primer lugar, se encuentra la planificación, que precede a la toma de datos en el campo y que se realiza, generalmente, en un laboratorio, en base a programas de diseño de vuelo. Luego, se realiza el registro, que es la captura de imágenes mediante cámaras fotográficas, drones u otros instrumentos. Este puede realizarse en un museo o depósito, en el caso de artefactos, o en el campo, en todos los demás casos. Por último, se encuentra el procesamiento de las imágenes mediante programas de fotogrametría y otros datos obtenidos en la fase de registro, que permiten obtener los *productos* del modelamiento fotogramétrico. Dado que este artículo se centra en el modelamiento de sitios arqueológicos, que en la mayoría de los casos se realiza a través del procesamiento fotogramétrico de imágenes cenitales y oblicuas producidas por drones, en adelante nos referiremos a este tipo de registro.

2.1. La planificación (Fig. 1)

Antes de iniciar el registro, es decir, antes de tomar fotos con cámaras o drones, es menester planificar el trabajo que se realizará con el mayor detalle posible. Ciertamente se puede realizar el registro sin ninguna planificación, lo que es posible cuando se tiene la experiencia para hacer esto, pero para la mayoría de las ocasiones es mejor tener un buen plan. Para esto es conveniente utilizar

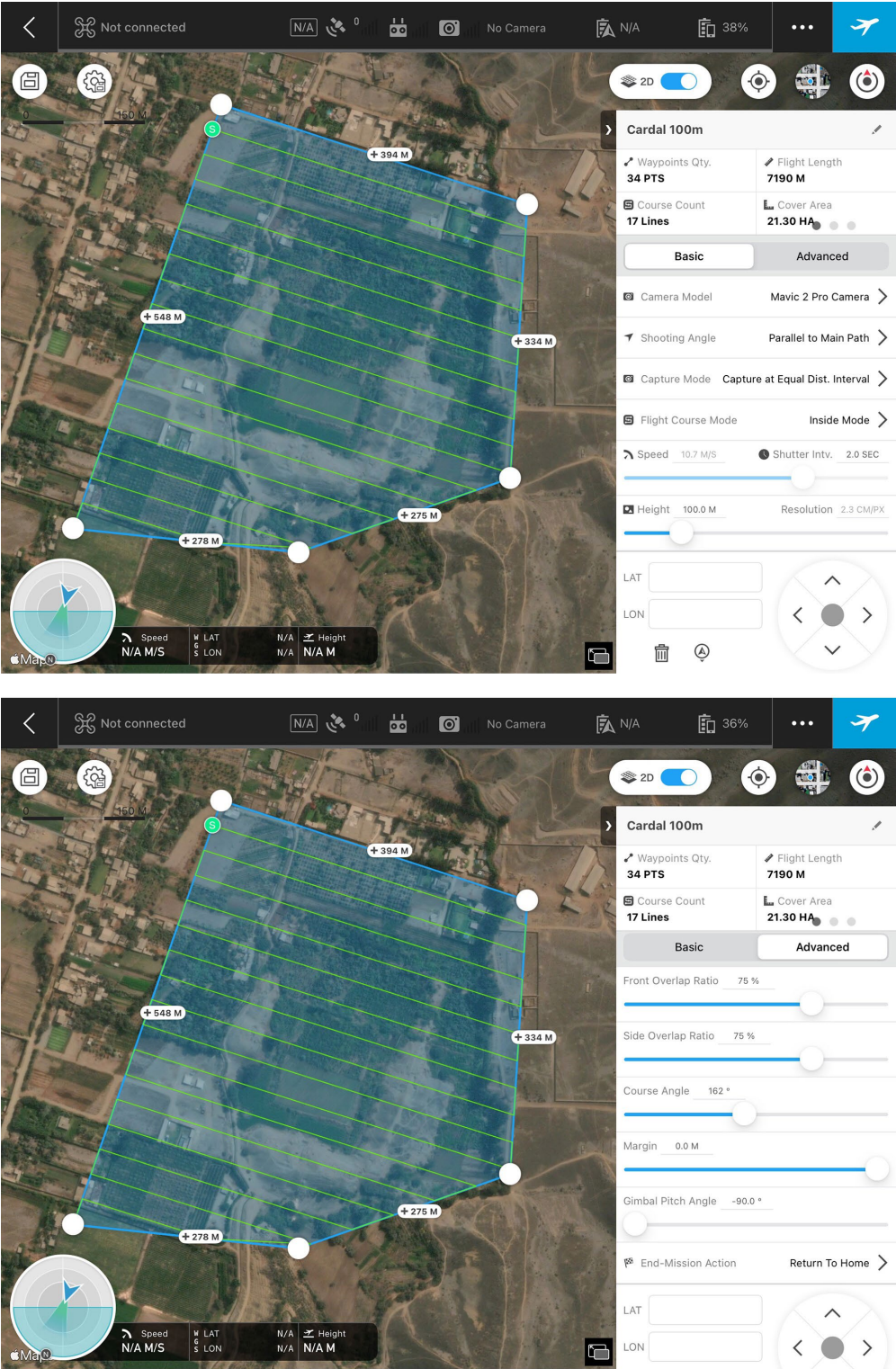


Figura 1. Planificación. Capturas de pantalla del programa de autopiloto o planificación de vuelo DJI GS Pro con los parámetros definidos para el vuelo sobre Cardal, valle de Lurín (imágenes: Luis Jaime Castillo/PASJM).

un programa de fotografía satelital como *Google Earth*, que no solo nos da una idea de la localización del sujeto, sus características generales o los componentes de su entorno, sino que, además, nos ofrece información clave sobre las alturas de los accidentes geográficos en torno a los cuales se dispone el sujeto. Es importante indicar que la información que se encuentra en un programa de imágenes satelitales es inexacta, puesto que muchos accidentes y elementos no se ven reflejados y la georreferenciación (la ubicación en el espacio geodésico) puede tener errores de decenas de metros.

Es muy importante, entonces, inspeccionar el sujeto que se registrará y su entorno para detectar la presencia de algún obstáculo que pudiera poner en riesgo el aparato o que interrumpa la toma de imágenes. Antenas, árboles altos, edificios, así como personas o, en términos generales, cualquier elemento ajeno al sujeto que pudiera impedir un registro completo debe ser detectado a tiempo para ser retirado o para planificar el registro, evitándolo. En el entorno rural es frecuente encontrar antenas o torres eléctricas, así como árboles, por lo que, si el registro fotogramétrico se realiza con drones, habrá que decidir si se sobrevuelan o se evitan. Por otro lado, en un ambiente urbano los obstáculos suelen ser postes, antenas o cualquier cosa que obstruya la vista y, por lo tanto, el registro del sujeto. Las personas y los vehículos tienden a moverse por sí solos, pero otros obstáculos son fijos y solo pueden removerse durante el procesamiento fotogramétrico o, en el peor de los casos, no pueden retirarse, y formarán, necesariamente, parte del modelo, como es el caso de un cartel pegado a una pared.

Durante la planificación es importante definir la extensión del terreno que se registrará y la disposición de los elementos en este. El polígono de vuelo debe contener todo el contexto, sitio o región, según sea el caso, y el entorno circundante que se le quiera dar. Es tan errado definir un polígono muy grande como uno muy pequeño. La razón es la siguiente: si es muy grande, comprenderá áreas sin interés y tanto el registro como el procesamiento tomarán más tiempo del necesario. Por el contrario, si es muy pequeño, dejará fuera del modelo partes integrantes del sujeto. En cualquier situación, la última verificación debe hacerse en el terreno al inicio de la fase de registro.

Como ya se ha señalado, cuando el registro se hace con un dron, es menester planificar todos los aspectos posibles con un programa de autopiloto o diseño de vuelo. A continuación, se detallan los parámetros que se pueden definir con la mayoría de los programas de autopiloto:

Cámara. Lo primero es indicar al programa qué tipo de cámara se empleará para hacer el registro. Algunos programas pueden detectar esto automáticamente si se le indica el tipo de dron que se usará. Una vez definida la cámara, el programa ajustará el tipo de lente, su resolución, etcétera.

Polígono de vuelo. En estos programas se puede establecer con precisión el área de vuelo, la cual está definida por un polígono que abarca todo el área a volar. Este polígono puede definirse inicialmente en *Google Earth* y, posteriormente, exportarse al programa de autopiloto o precisarse directamente en el programa. Incluso, se puede determinar volando el dron sobre el terreno y fijando los vértices del polígono directamente en el campo.

Altura y resolución. La altura, o la distancia entre la cámara y el sujeto, determinará la resolución o calidad de la imagen que se mide en píxeles por centímetro (ver Castillo Butters y Barrera Yaranga 2024: Tabla 1). La resolución es inversamente proporcional a la altura de vuelo y al número de imágenes. Es decir, a mayor altura, menor resolución y menor número de imágenes, mientras que, a menor altura, mayor resolución y mayor número de imágenes. En la Tabla 1 de la primera parte de este artículo se puede observar las resoluciones que se obtienen a diferentes alturas, así como el número de fotos que se requiere para el registro a diferentes alturas. Lo ideal es no volar ni muy alto ni muy bajo. Así, si se quiere obtener solo la topografía de un sitio o polígono, se debe volar alto, siendo entre 150 y 200 metros una altura perfectamente aceptable. Sin embargo, si lo que se quiere es modelar la arquitectura de un sitio, entonces es aconsejable que el vuelo sea bajo, entre 25 y 50 metros.

Superposición u *overlap*. Las imágenes que se usan para modelar deben tener un alto grado de redundancia, es decir, es indispensable que cada punto, superficie y detalle esté representado en varias imágenes tomadas desde diferentes ángulos. De ahí la necesidad de que haya una superposición de imágenes, lo que en inglés se denomina *overlap*, tanto en su aspecto horizontal (entre una foto y la siguiente) como vertical (entre un transecto y otro). Idealmente, la superposición horizontal y vertical debe de ser igual o mayor de 75 %, es decir, que cualquier aspecto del objeto aparecerá en al menos 16 fotos, cuatro en cada transecto por cuatro transectos (ver Castillo Butters y Barrera Yaranga 2024: Tabla 1). Superposiciones de menos de 65 % no son aceptables, puesto que afecta la calidad de los modelos.

Orientación del vuelo, punto de partida y acción final. Otros parámetros que se definen en los programas de autopiloto son el ángulo de orientación del vuelo, que puede ser paralelo o perpendicular a la distancia máxima recorrida, o cualquier otra orientación. También se encuentra el punto de partida, que debe de estar lo más cercano a la ubicación inicial del aparato (también llamada *Home*), y la acción que tomará el dron al finalizar la tarea.

2.2. El registro

Algunos de los parámetros discutidos en el punto anterior se aplican también a la fase de registro, como la verificación de obstáculos, la corrección del área o polígono de registro, la altura, etcétera. Aun cuando estos parámetros ya han sido establecidos en la fase de planificación, es importante verificarlos in situ antes de iniciar el registro en sí, particularmente, cuando este registro se hará a través de un programa automático, que una vez iniciado no se puede alterar. Así, si una vez iniciado el vuelo automático nos equivocamos en el diseño del polígono de registro, o en la altura para, por ejemplo, evitar árboles, esto no se podrá corregir y el registro será incompleto, o podría poner en riesgo el equipo. Asimismo, una inspección detallada del terreno es particularmente importante cuando se vuela en zonas complicadas, con mucha vegetación, con mucha gradiente, o con obstáculos a la mitad del trayecto. Muchas veces los puntos más peligrosos son los que están más próximos al piloto, en el punto de aterrizaje y despegue del dron, puesto que allí el aparato volará más bajo y estará más expuesto a, por ejemplo, postes o cables eléctricos, aves, personas y vehículos.

Las imágenes que se obtienen con un dron se pueden agrupar en tres tipos, que definen tres estrategias de registro:

Imágenes cenitales (mosaicos) (Fig. 2)

Son imágenes obtenidas con la cámara apuntando perpendicularmente al plano de vuelo, esenciales para un registro correcto de los aspectos horizontales del terreno, aunque también cubren parcialmente aspectos verticales. Sea que estas imágenes se hagan con una cámara fotográfica, o con un dron controlado por un programa de vuelo, o volando bajo el control del piloto, es muy importante obtener un mosaico de imágenes con la superposición adecuada (75 % o más).

Imágenes oblicuas (coronas y cinturones) (Figs. 3 y 4)

Las *coronas* son bandas de imágenes que se toman alrededor y por encima del objeto a diferentes alturas, distancias y ángulos. Junto con los *cinturones*, permiten una cobertura completa de los aspectos verticales del objeto. Los cinturones son bandas de imágenes que se toman alrededor del objeto, a mitad del cuerpo de este, con la cámara apuntando perpendicularmente hacia su centro. Los cinturones son, en complemento con las coronas, esenciales para un correcto registro de los aspectos verticales de los objetos.

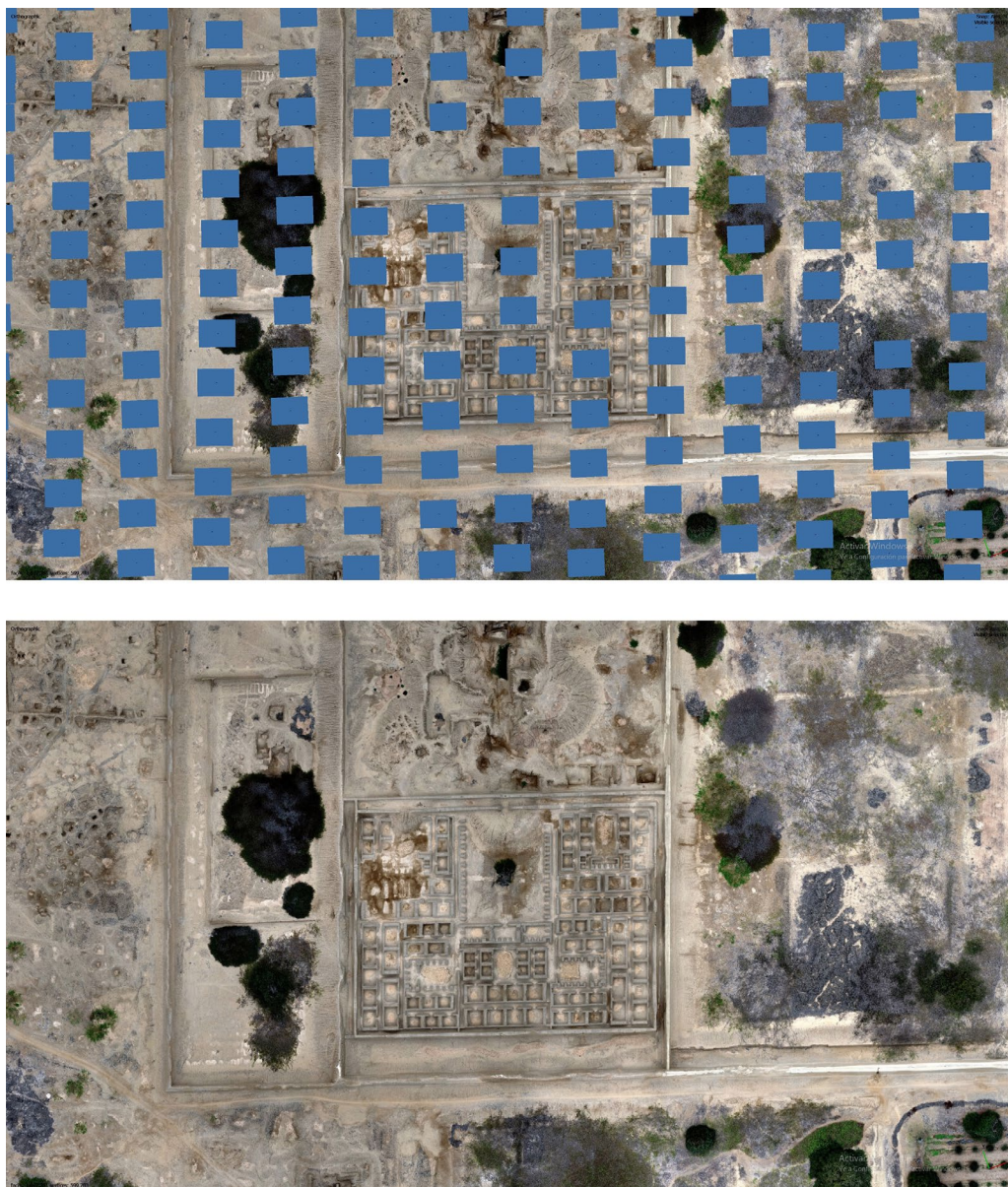


Figura 2. Mosaico de imágenes cenitales elaborado con DJI GS Pro para la documentación de una sección de Chan Chan, valle de Moche, y la ortofoto resultante (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

Imágenes oblicuas (cúpulas) (Fig. 5)

La cobertura fotográfica de un objeto debe concebirse como una cúpula formada por diversos círculos alrededor del objeto, a diferentes alturas y ángulos que permitan que la cámara apunte hacia el centro del objeto. Estas imágenes deben, en conjunto, crear la forma de una semiesfera o cúpula. En realidad, un modelo 3D puede requerir no solo de una cúpula general, sino de varias cúpulas menores dispuestas sobre los elementos que conforman el objeto.

Quizá el aspecto más importante, en las fases de planificación y registro, es adecuar la captura de la información a la geometría peculiar de cada sujeto. Como veremos en los ejemplos que siguen,

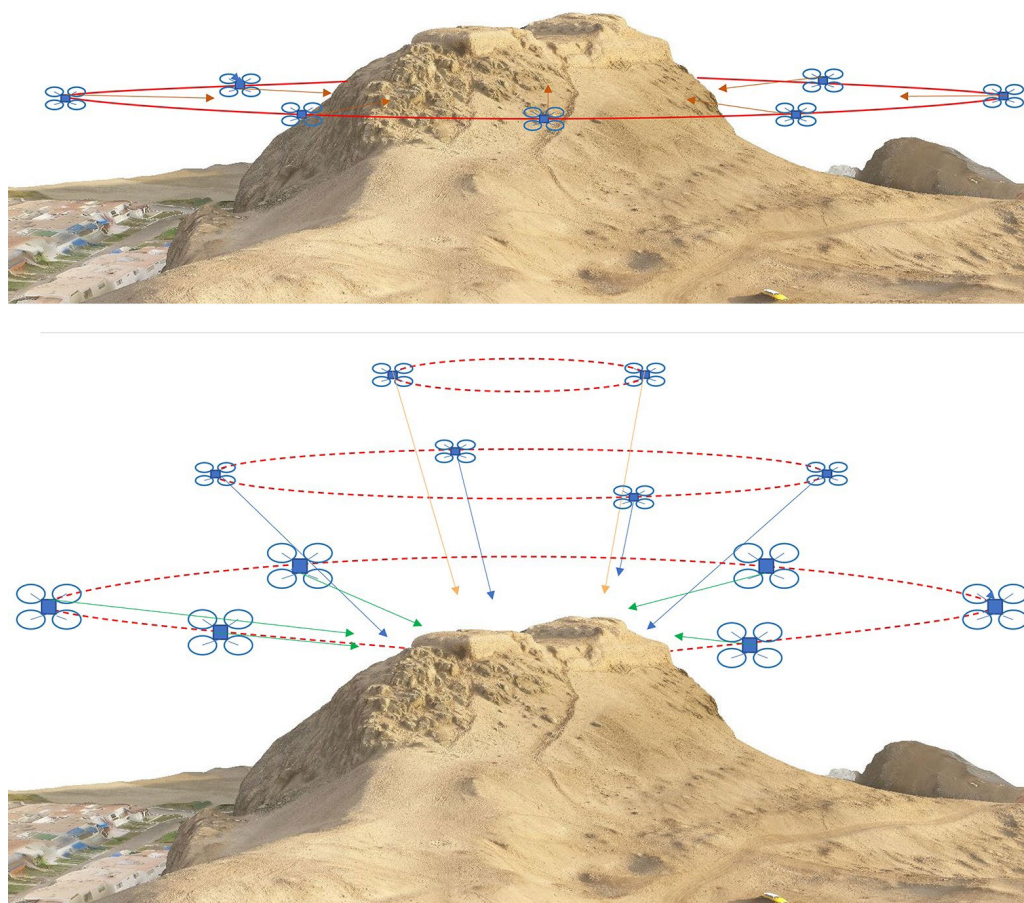


Figura 3. Cinturones y coronas definidos para el registro fotogramétrico de sitios con elevación (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

en muchos casos, cuando se registra un área extensa y plana con una geometría básicamente horizontal, es suficiente hacerlo con un vuelo compuesto por un mosaico de imágenes cenitales. Si hubiera en este terreno algún elemento prominente, este podrá requerir de algunas imágenes oblicuas, a manera de una corona sobre el elemento, lo que permitirá modelar los aspectos verticales como paredes, torres, postes, o árboles. Para los sujetos compuestos por múltiples planos, como el interior de un edificio conformado por muchas habitaciones, es indispensable combinar un mosaico de imágenes cenitales, y tantas coronas y cúpulas como sean necesarias. Como veremos, durante la fase del procesamiento no todas las imágenes tomadas serán procesadas, pero las que

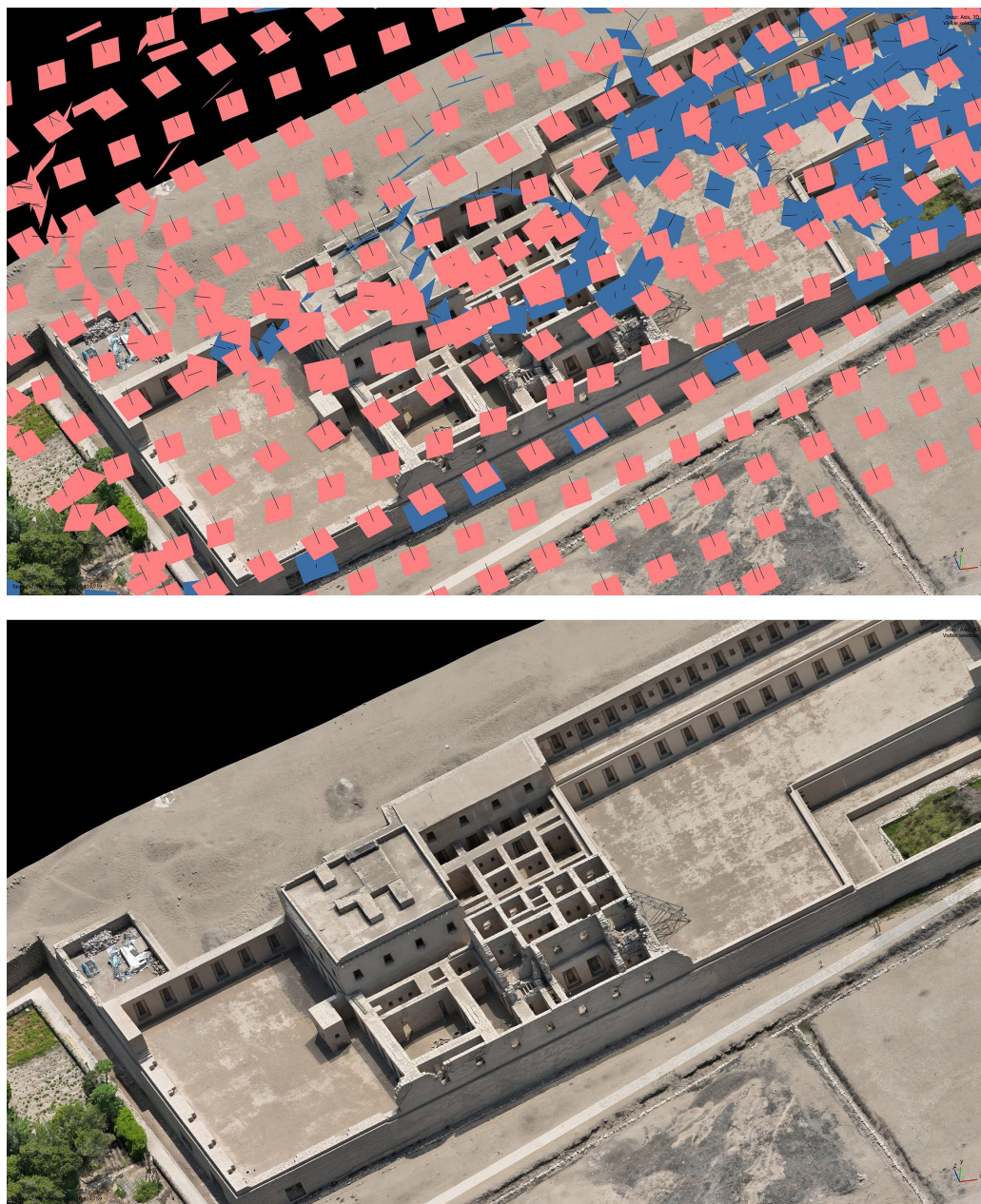


Figura 4. Cinturones de imágenes oblicuas para el registro fotogramétrico del Akllawasi de Pachacamac, valle de Lurín (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

no se hayan tomado pueden complicar el modelamiento. Es mejor que sobre a que falte y la experiencia ayudará a determinar cuándo se han conseguido suficientes imágenes.

2.3. El procesamiento

La tercera fase en el proceso de documentación y modelamiento 3D corresponde al procesamiento mediante computadoras y programas informáticos de fotogrametría de las imágenes

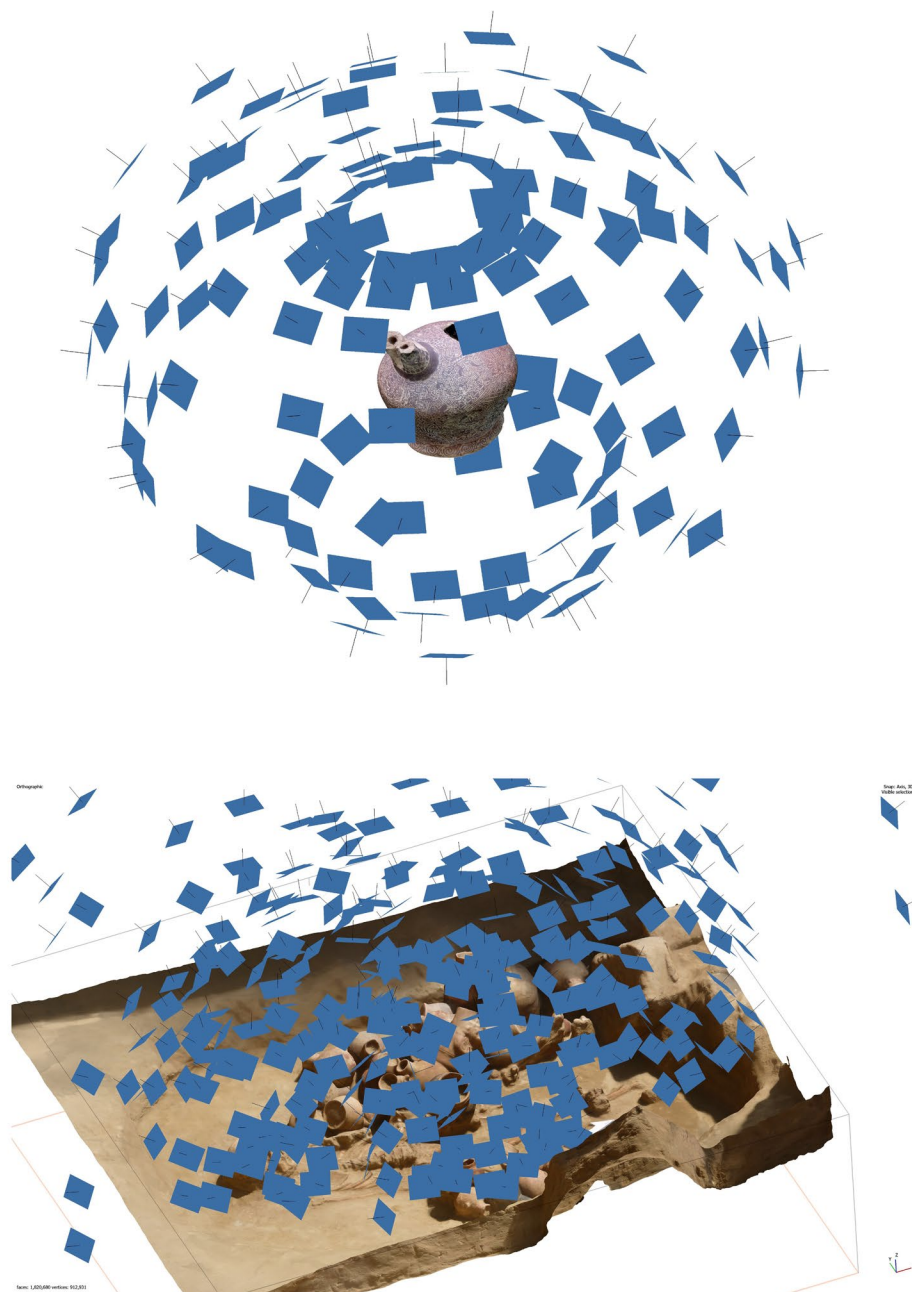


Figura 5. Cúpulas de fotos oblicuas sobre un artefacto y una tumba para su modelamiento tridimensional fotogramétrico (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

obtenidas en el registro. En esta fase se verificará si la planificación y el registro fueron correctos y si se obtuvo toda la información necesaria. Aun cuando se puedan corregir ciertos errores, a mejor data, mejores resultados. Los tres factores involucrados en el procesamiento: las imágenes, las computadoras (*hardware*) y los programas de fotogrametría (*software*), requieren de una discusión más detallada.

A fin de poder hacer un modelamiento de alta calidad requerimos imágenes nítidas y bien enfocadas, obtenidas con cámaras de resoluciones mayores a los 15 megapíxeles que cubran la totalidad de la superficie que conforma el objeto a ser documentado. Las imágenes deben tomarse, idealmente, cuando el objeto esté bien iluminado, pero evitando que haya alguna sombra muy intensa que oscurezca por completo una de sus partes. La iluminación ideal es la de un día nublado pero luminoso, con las nubes actuando como un filtro natural. Estas imágenes, tanto cenitales como oblicuas, deben haberse obtenido en la fase de registro y deben estar ordenadas y correctamente agrupadas en carpetas que reflejen su contenido.

Las computadoras que se requieren para procesar las imágenes deben ser, en general, potentes, puesto que el procesamiento hace un uso intensivo de las capacidades del procesador, la memoria RAM y la tarjeta gráfica, lo que las hace también costosas. La potencia de estas computadoras se reflejará en el número de fotografías que se puedan procesar y en el tiempo que tomará el procesamiento. Las páginas web de los programas *Agisoft Metashape*¹ y *Pix4D Mapper*² recomiendan que la memoria RAM sea de entre 64 y 128GB o más, que el CPU sea el más alto disponible (*v.g.*, Intel i9 10900K 10-Core) y que la GPU sea también de muy alto rendimiento (*v.g.*, NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti 11GB). Estas máquinas deben tener discos duros muy grandes: 2TB SSD para los programas y al menos dos discos duros de 18TB para el almacenamiento. Evidentemente, es posible ejecutar los programas con máquinas de menor configuración, pero el tiempo de procesamiento será inversamente proporcional a la capacidad de la computadora. Es importante recalcar que el procesamiento de las imágenes generará archivos muy grandes, particularmente si se procesa a alta resolución. Además, es importante contar con la debida cantidad de memoria de almacenamiento para estos procedimientos. También es necesario considerar medidas de almacenamiento a largo plazo, ya que la memoria se deteriora con el tiempo. Idealmente es conveniente tener múltiples *back-ups*, tanto con las imágenes originales, como con los resultados del procesamiento y los productos generados. Asimismo, es importante tomar conciencia de que tiene que implementarse algún mecanismo de almacenamiento a largo plazo.

Existen muchos paquetes de *software* de fotogrametría que se utilizan para procesar y transformar imágenes bidimensionales en modelos tridimensionales y nubes de punto, de los cuales se extrae una serie de productos como ortofotos, modelos digitales de elevación, superficie y terreno, modelos 3D, topografía digital, etcétera³. No vamos a describir aquí, paso a paso, el procesamiento de las imágenes que realiza el *software* de fotogrametría, ya que esto suele estar descrito con detalle en los tutoriales o las guías de usuario de cada programa. Basta con señalar que estos programas son complejos y tienen muchos parámetros que se pueden modificar a fin de obtener resultados muy diferentes y de mayor o menor resolución, así como de tamaño. Los programas de planificación de vuelo, además, incluyen secuencias de trabajo (*workflows* en inglés) que simplifican su uso y permiten lograr resultados de manera rápida y fácil. Estos dan la impresión de que el *software* es una caja negra en la que uno introduce las fotos por un extremo y el modelo 3D sale por el otro ya listo y embalado. Sin embargo, lograr una verdadera pericia en el manejo de estos programas toma tiempo y mucha práctica, así como requiere familiarizarse con otros programas que ayudarán en la edición de los modelos.

El procesamiento puede mejorar considerablemente la calidad de los modelos, su textura, los detalles que se modelan, la calidad de los productos que se generan, etcétera.

3. TIPOS Y ESTRATEGIAS DE REGISTRO Y DOCUMENTACIÓN

3.1. Tipo 1: modelamiento 3D de sitios planos exclusivamente mediante imágenes cenitales (ejemplos: Sechín Alto, valle de Casma, Áncash (Fig. 6); ciudadelas de Chan Chan, valle de Moche, La Libertad (Fig. 7))

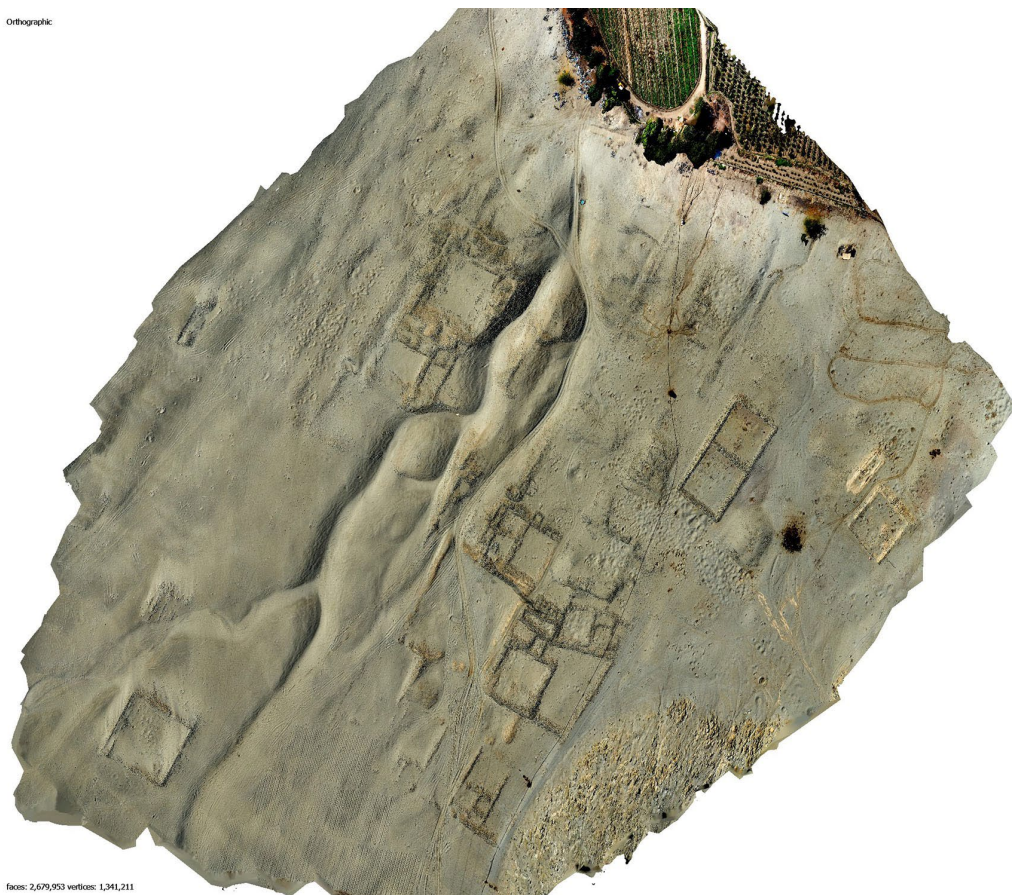
Cuando el sitio arqueológico que se va a modelar es relativamente plano, es decir, no tiene ninguna elevación, ni muros o prominencias, bastará con un conjunto de imágenes cenitales para documentarlo. Este tipo de registro también aplica a situaciones en que, aunque con elevaciones, el registro y la documentación no tiene como objetivo enfatizar los aspectos verticales sino, por el contrario, se orienta a producir una imagen bidimensional, como puede ser un modelo de elevación digital (DEM), una topografía digital, o una ortofoto. Por ejemplo, este método se debe usar para producir el DSM que luego alimentará al programa de planificación para generar un vuelo con seguimiento del terreno (ver líneas arriba). Las imágenes que se requieren para este tipo de registro se obtienen casi necesariamente mediante un vuelo con dron controlado por un programa de planificación de vuelo. El programa generará un plan de vuelo a partir de parámetros que se especifican en la fase de planificación, siendo los más relevantes el área y el perímetro de registro, la altura del vuelo (que determinará la resolución de cada foto), y la superposición (*overlap*) lateral y frontal. Con estos datos, el programa diseña el vuelo, los transectos y el número de fotos, a partir de las cuales se generará automáticamente un mosaico de imágenes cenitales.

La técnica que se emplea es la misma que se utiliza para prospeccionar grandes áreas (Castillo Butters y Barrera Yaranga 2023), pero al ser un sitio más pequeño que una región, es decir, al tener una extensión mucho más limitada, se puede registrar más intensamente y con mayor resolución, volando más bajo y con una mayor superposición. A manera de ejemplo, en Castillo Butters y Barrera Yaranga 2024: Tabla 1, se pueden observar los detalles de volar un área de nueve hectáreas, es decir, de 300 por 300 metros. Volando con un dron DJI Phantom 4 RTK a 25 metros de altura y con una superposición vertical y horizontal de 75 %, se obtiene una resolución de 0.7 cm/pix y se toman 1536 fotos. Los mismos parámetros de vuelo con un dron Mavic 3 producirán una resolución de 0.6 cm/pix y 2072 fotos. Ambos resultados son muy buenos. En comparación, si usamos un dron DJI Phantom 4 RTK en la prospección de un área de un kilómetro cuadrado (o 100 hectáreas), tendremos que volar a 100 o más metros de altura, con lo que obtendremos una resolución de 2.7 cm/pix y se tomarán 1041 fotos.

Para ilustrar el tipo 1 de registro hemos escogido dos ejemplos. El primero corresponde al sitio de Sechín Alto, ubicado en una quebrada en la margen izquierda del valle de Casma, en la región Áncash (Fig. 6). La quebrada está cortada por el lecho de una corriente de agua pero, en general, se trata de una superficie relativamente plana. Sin embargo, una línea de alta tensión eléctrica cruzaba por el medio del sitio, lo que obligaba a que el dron volara por encima de las torres. La arquitectura está compuesta por paredes derruidas de cuartos y patios rectangulares. Se logró registrar a detalle la forma del asentamiento y los detalles de la arquitectura con un mosaico de fotos cenitales. La falta de elevaciones significativas hizo que las imágenes oblicuas no fueran necesarias. Por el contrario, habrían complicado el proceso de modelamiento. El registro se realizó el 13 de julio del 2022 con un dron DJI Phantom 4 Pro equipado con una cámara de 20 megapíxeles. Se tomaron 555 fotos a una altura de 80 metros sobre el sitio, con una superposición frontal y lateral de 75 %. Luego del procesamiento, se logró una resolución de 1.46 cm/pix. Si las torres no hubieran estado presentes, lo más probable es que el vuelo se hubiera realizado a 50 metros de altura.

El segundo ejemplo del tipo 1 corresponde a la capital imperial de Chan Chan, ubicada al norte de la ciudad de Trujillo, en la región La Libertad. Dentro de este gran sitio arqueológico, en la sección norte, se ubican las ciudadelas Squire y Uhle (Fig. 7). La documentación se realizó con un dron Phantom 4 Pro RTK equipado con una cámara de 20 megapíxeles. El registro se realizó el 13 de junio del 2018 y generó 1513 fotos a 50 metros de altura, que luego de su proce-

Orthographic



facets: 2,679,953 vertices: 1,341,211

Orthographic

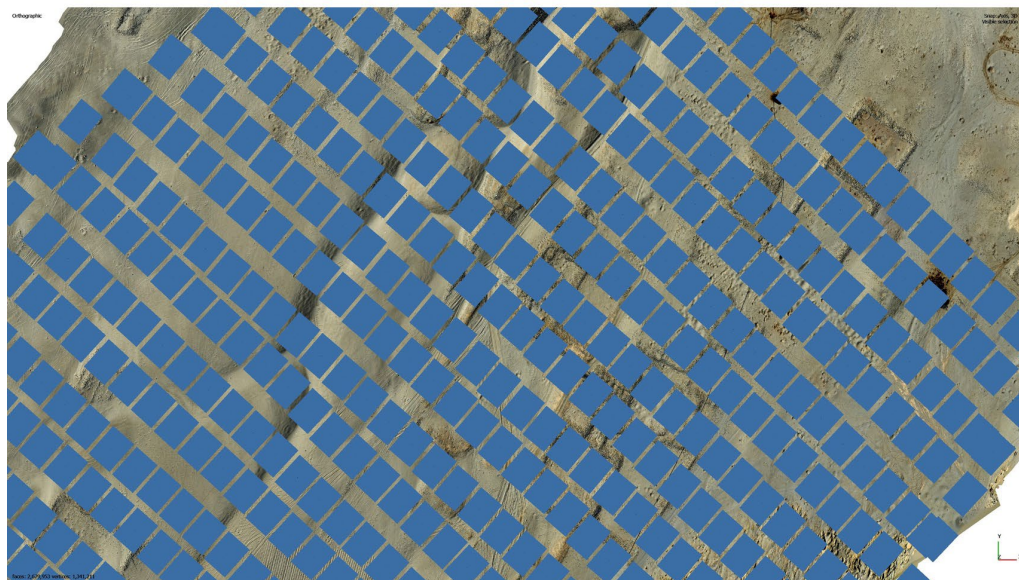


Figura 6. Tipo 1. Modelamiento 3D de sitios planos exclusivamente mediante imágenes cenitales. Sechín Alto, valle de Casma, Ancash (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

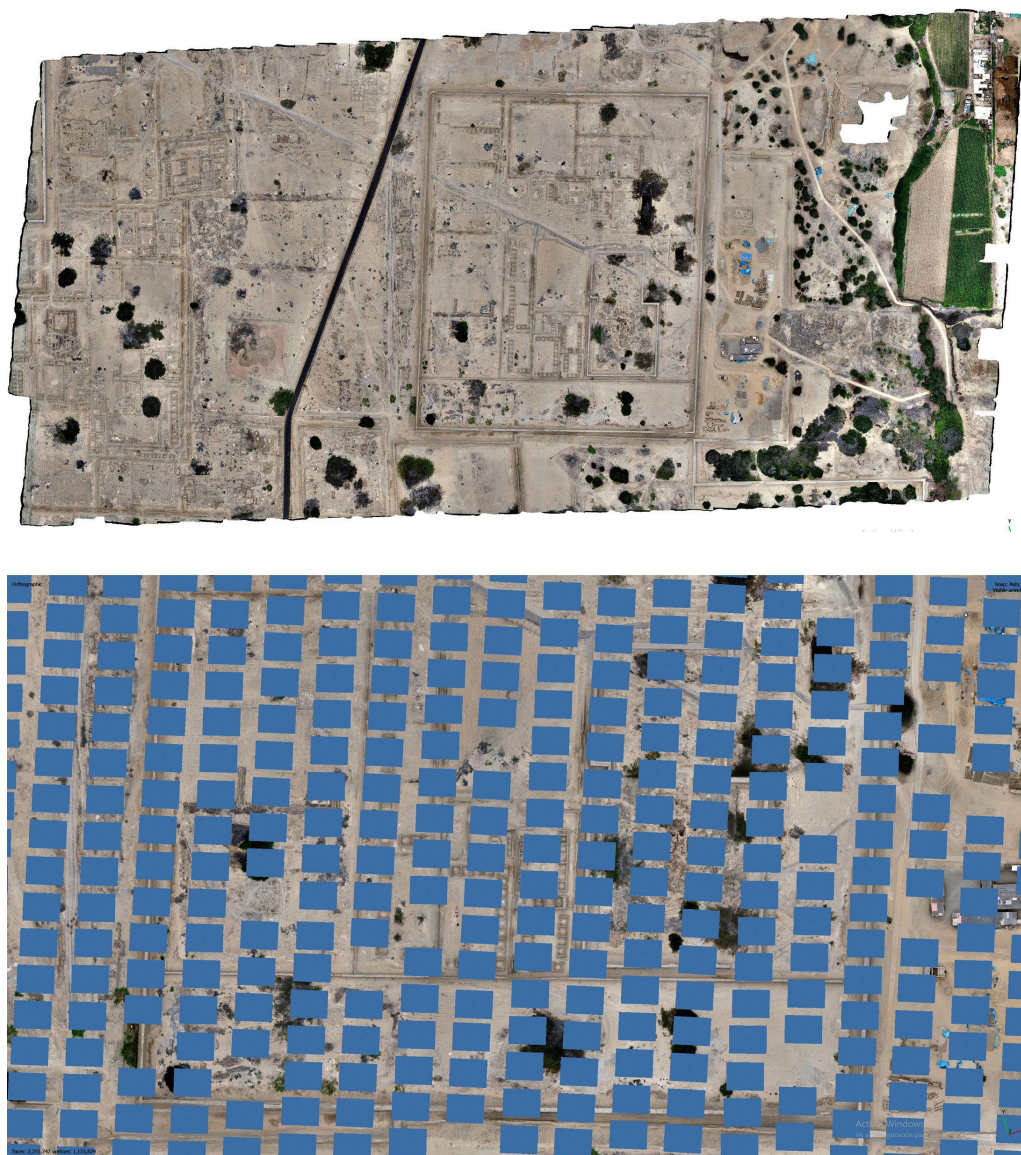


Figura 7. Tipo 1. Modelamiento 3D de sitios planos exclusivamente mediante imágenes cenitales. Ciudadelas de Chan Chan, valle de Moche, La Libertad (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

samiento produjeron una resolución de 1.03 cm/pix. El área total de la sección norte comprende 43 hectáreas, dentro de las cuales no se encontró ningún obstáculo, por lo que se pudo volar a una altura relativamente baja (50 metros) y obtener una resolución muy alta. Esta documentación, sin embargo, no enfatizó el levantamiento de los volúmenes de las paredes, sino que se enfocó en la obtención de un plano de área, con gran detalle, por lo que no se complementó el mosaico de imágenes cenitales con coronas de imágenes oblicuas. Este es, entonces, el registro más sencillo, ya que se trata de definir un polígono, una altura y una superposición, y el dron hace el trabajo por sí mismo.

3.2. Tipo 2: modelamiento 3D de sitios con relieve mediante imágenes cenitales y coronas oblicuas generales (ejemplo: Huaca El Obispo, Chan Chan, valle de Moche, La Libertad (Fig. 8))

El segundo tipo de registro corresponde a sitios donde encontramos algunas prominencias o elevaciones, por los que el mosaico de imágenes cenitales obtenidos con el programa de planificación de vuelo debe complementarse con una serie de imágenes oblicuas que, en conjunto, formen una corona sobre el sitio. Para este segundo tipo es importante insistir en que los sitios que se documentan con este método no tienen una gran complejidad arquitectónica. Es decir, son en general huacas o montículos de un solo promontorio. Como en el caso anterior, el registro se inicia con un mosaico de imágenes cenitales que abarcan todo el sitio y el área que lo rodea para darle contexto al modelo. Una vez culminado el registro cenital se procede a realizar una o más coronas alrededor del sitio a alturas variables.

El caso que presentamos para ilustrar este segundo tipo proviene de la Huaca El Obispo, ubicada en el Complejo Arqueológico de Chan Chan, al norte de las ciudadelas y de la Huaca Toledo, con la que tiene varias características en común (Fig. 8). El Obispo es un montículo de contorno redondeado que originalmente debió ser una estructura de perímetro cuadrangular. Como todos los montículos de Chan Chan, fue intensamente huaqueado desde el inicio de la época colonial, por lo que su forma fue severamente alterada. Aún hoy se puede ver que el centro del montículo está totalmente horadado y que al norte de la huaca existe una enorme acumulación de material, posiblemente extraído del corazón de la misma. El registro de la Huaca El Obispo se realizó el 18 de julio del 2022 con un dron Phantom 4 Pro equipado con una cámara de 20 megapíxeles. Se tomaron 436 imágenes (242 cenitales y 194 oblicuas correspondientes a dos coronas), pero solo se procesaron 398 imágenes. El registro de las imágenes cenitales se realizó a 50 metros de altura y las coronas se ubicaron una por encima y otra por debajo del plano de las imágenes cenitales. La resolución de la ortofotografía fue de 1.78 cm/pix. Las imágenes oblicuas obtenidas con el vuelo en corona sirvieron para mejorar los aspectos verticales de la estructura, tanto en el exterior de la huaca como en la perforación de su centro.

3.3. Tipo 3: modelamiento 3D de sitios con arquitectura compleja mediante imágenes cenitales, coronas oblicuas generales, coronas puntuales, y cinturones (ejemplos: Huacas de Sipán, valle de Reque, Lambayeque (Fig. 9); Akllawasi de Pachacamac, valle de Lurín, Lima (Fig. 10))

El tipo 3 de modelamiento es el más complejo de los métodos convencionales de documentación de sitios arqueológicos. Comprende mosaicos de imágenes cenitales y coronas generales y puntuales, y se emplea para sitios que tienen una arquitectura o geometría compleja, o que se quieren modelar con mucho detalle. La decisión de emplear el tipo 2 o 3 de documentación fotogramétrica dependerá de la experiencia del piloto y del objetivo de la misión de registro. La diferencia entre esos dos tipos de registro está en la inclusión, en el caso del tipo 3, de coronas puntuales y detalladas para registrar algún componente de la arquitectura o topografía con una mayor resolución. Esta decisión es, por definición, arbitraria. Esto se puede ver con más claridad en el tercer ejemplo del tipo 1, el registro de arquitectura en la parte norte de Chan Chan. Si se hubiera querido enfatizar los aspectos verticales de la arquitectura chimú, hubiera sido necesario hacer el registro empleando el tipo 3, es decir, incluyendo múltiples coronas puntuales de los diferentes componentes tomados a diferentes alturas para capturar los detalles de los aspectos verticales de la arquitectura, ya que con solo imágenes cenitales estos detalles no se hubieran documentado. Como se observó previamente, obtuvimos una ortofoto de alta resolución solo con un mosaico de imágenes cenitales, pero no de mucho detalle en lo que corresponde a los aspectos verticales. Los dos ejemplos que presentamos para ilustrar el tipo 3 de registro y documentación corresponden a las huacas de Sipán del valle de Reque, ubicadas en la región Lambayeque, y al Akllawasi de Pachacamac, en el valle de Lurín, región Lima.



Figura 8. Tipo 2. Modelamiento 3D de sitios con relieve mediante imágenes cenitales y coronas oblicuas generales. Huaca el Obispo, Chan Chan, valle de Moche, La Libertad (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

El primer ejemplo del tipo 3 de documentación de un sitio arqueológico complejo con drones es Sipán o, más precisamente, los tres montículos que conforman el sitio: dos mayores ubicados al oeste y centro, y uno menor, la plataforma funeraria donde se hallaron las tumbas reales del Señor de Sipán, el Viejo Señor de Sipán, así como numerosos sacerdotes y acompañantes que se encuentran en el extremo este del sitio (Fig. 9). Como se observa en las imágenes, se trata de dos estructuras de adobe de gran complejidad y altura, y un montículo menor, lo que inmediatamente hace presumir que el registro debe comprender no solo un mosaico de imágenes cenitales

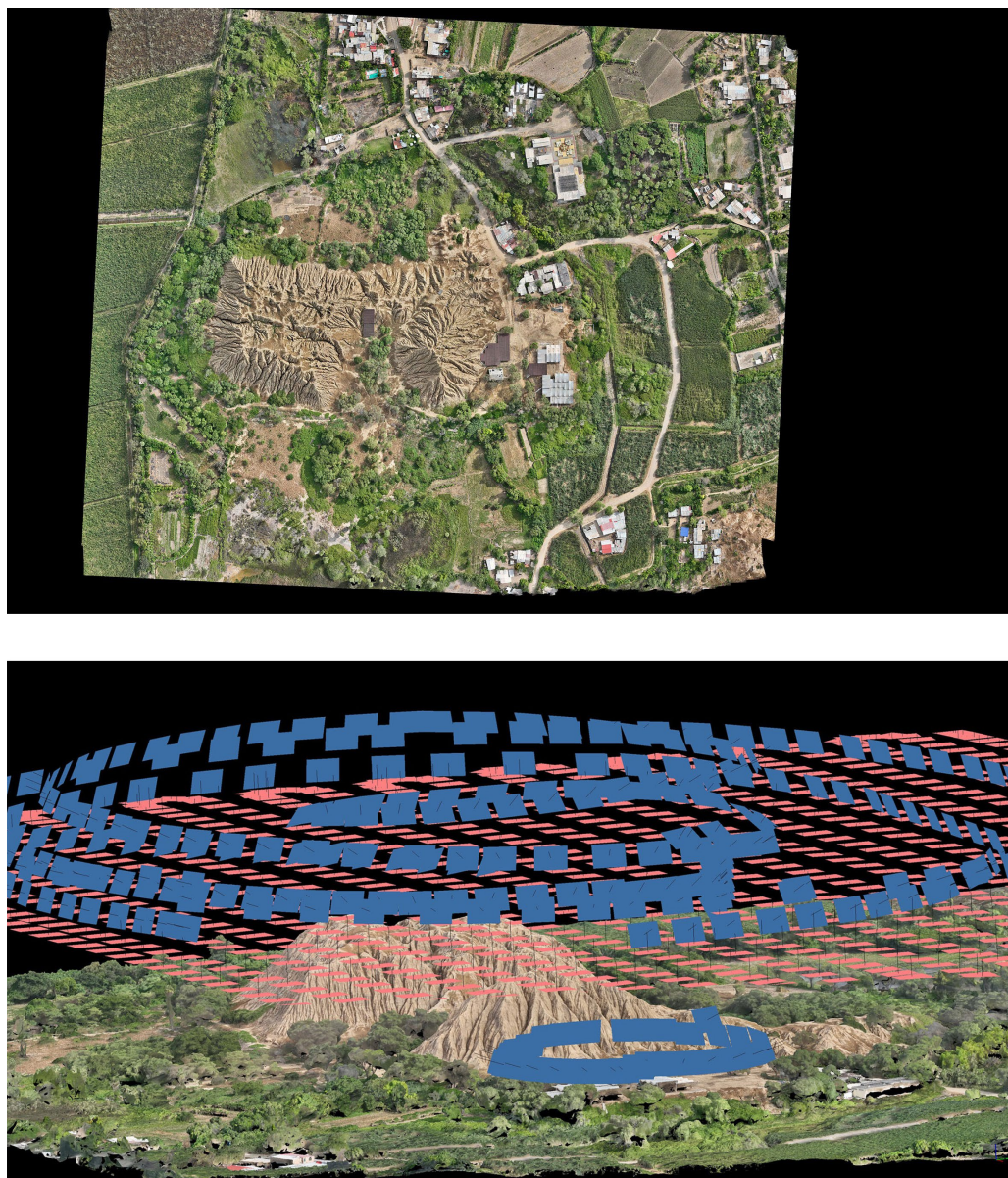


Figura 9. Tipo 3. Modelamiento 3D de sitios con arquitectura compleja mediante imágenes cenitales, coronas oblicuas generales, coronas puntuales, y cinturones. Huacas de Sipán, valle de Reque, Lambayeque (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

(tipo 1), sino coronas para registrar los aspectos verticales de los montículos. Estas coronas son generales (tipo 2), para capturar la totalidad de los montículos, y puntuales, con el fin de capturar los detalles. El registro de este sitio se hizo el 20 de mayo del 2023 con un dron DJI Mavic 3E equipado con una cámara de 20 megapíxeles. Se tomaron 1253 fotografías, 941 imágenes cenitales y 312 oblicuas en diversas coronas. El vuelo se realizó a 100 metros de altura desde la base de los montículos, cuya altura máxima estaba a 34 metros contados desde el punto de despegue, es decir, el dron se elevó 66 metros por encima del pico más alto de los montículos. El resultado del modelamiento fotogramétrico fue muy satisfactorio, como es posible verificar en las imágenes.

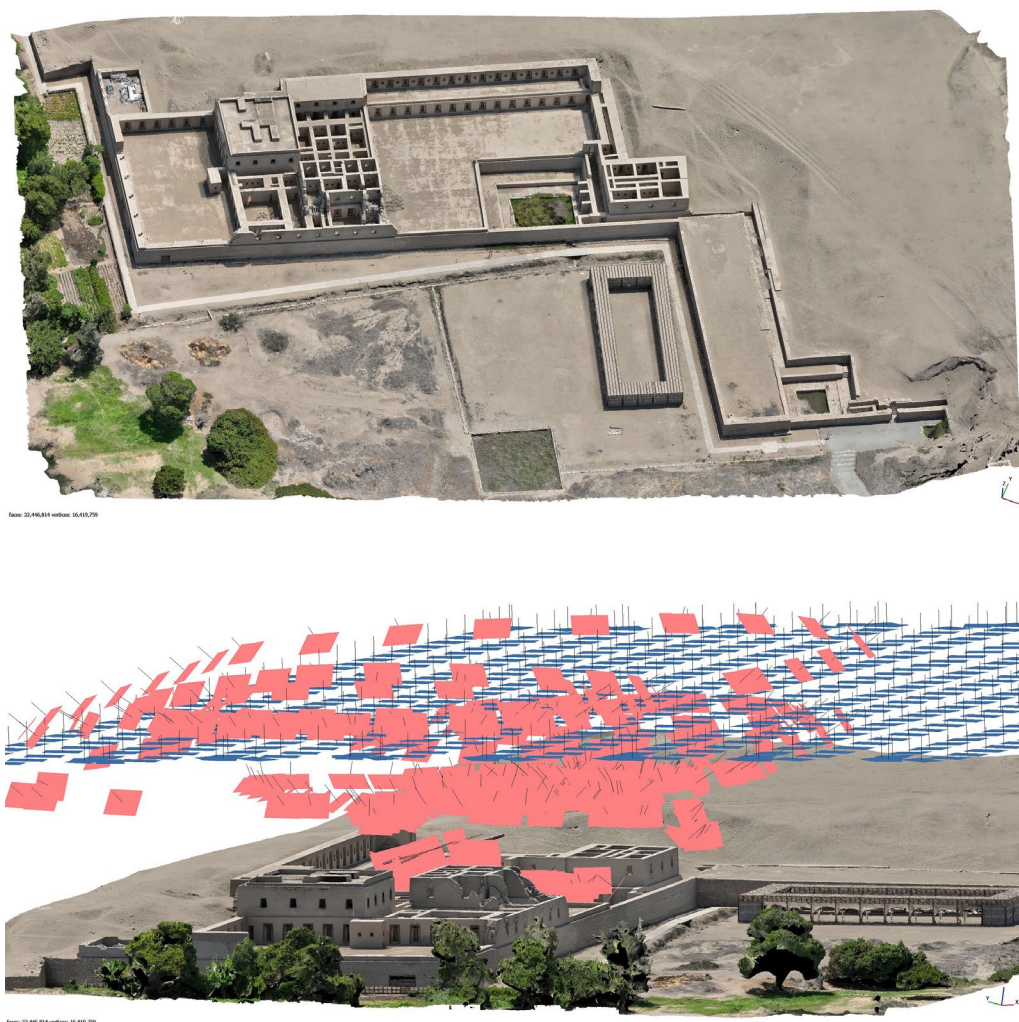


Figura 10. Tipo 3. Modelamiento 3D de sitios con arquitectura compleja mediante imágenes cenitales, coronas oblicuas generales, coronas puntuales, y cinturones. Akllawasi de Pachacamac, valle de Lurín, Lima (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

El segundo ejemplo del tipo 3 de documentación, donde se combinan mosaicos de imágenes cenitales con coronas generales y puntuales de imágenes oblicuas, corresponde al Akllawasi de Pachacamac (Fig. 10). Este edificio es un complejo de estructuras de dos pisos, patios, galerías, pórticos trapezoidales de doble jamba y estanques, ubicado al pie del Templo del Sol, en el lado oeste del centro ceremonial y oráculo de Pachacamac. La construcción tiene paredes de adobe, en algunos casos con bases de piedras canteadas, y ha sido reconstruida intensa e imaginativamente, como se estilaba en la década de 1950, por Arturo Jiménez Borja. Pachacamac está ubicado en el valle de Lurín, en la provincia y región de Lima. La dificultad de la documentación fotogramétrica del Akllawasi reside en el hecho de que su arquitectura es muy compleja y está formada por múltiples habitaciones pequeñas abigarradas, sobre todo en los dos edificios. En este caso no basta con una documentación general, sino que es necesario lograr que el modelo tridimensional refleje el interior de las habitaciones, los muros, los detalles de los pórticos y de las piedras empleadas para las construcciones, etcétera. Para este fin, el mosaico de imágenes cenitales no fue suficiente,

puesto que este solo enfatizaría los aspectos horizontales del sitio. Tampoco habría sido suficiente la corona general alrededor de la arquitectura, puesto que esta resaltaría los aspectos verticales de las paredes circundantes y las grandes estructuras. Para captar las paredes internas, las subdivisiones, los umbrales y pórticos fue necesario complementar el registro anterior con coronas más puntuales que enfatizaran los aspectos verticales de estas divisiones más pequeñas, de ahí la necesidad de hacer múltiples vuelos sobre las estructuras, a la menor altura posible. La combinación de todas estas perspectivas generó un modelo 3D muy detallado.

3.4. Tipo 4: modelamiento 3D de sitios de gran complejidad, mayormente mediante imágenes cenitales y oblicuas e imágenes desde la superficie obtenidas con cámaras fotográficas (ejemplo: Templo de la Luna, Huayna Picchu, Cusco (Fig. 11))

Los sitios arqueológicos de gran complejidad en su configuración arquitectónica, como la Llacta de Machu Picchu, en el Valle Sagrado del Cusco, o el Palacio de Sechín, en el valle de Casma, incluyen múltiples elevaciones, habitaciones, patios, áreas techadas, muros perimétricos y áreas deprimidas, todas enmarcadas en un entorno tan rico como complejo en cuanto a componentes; y que además, presentan decoración tanto en las paredes como detalles arquitectónicos. Estos son los tipos de sitios más complejos para modelar tridimensionalmente. También puede corresponder al tipo 4 un registro muy detallado de un sitio que, sin tener gran complejidad o decoración, se quiera modelar y documentar con una gran resolución y calidad, por ejemplo, al capturar cada una de las piedras que forman sus muros, las capas de pintura, las grietas y hendiduras. En ambos casos, sea muy complejo o simple, su registro requerirá de un método avanzado y compuesto por varias fases sucesivas de registro. En la modalidad de registro y documentación que hemos llamado aquí tipo 4, las imágenes deben permitir la reconstrucción de la forma de los componentes arquitectónicos, pero también de sus detalles decorativos. En los sitios muy complejos, la captura de la información se debe realizar necesariamente en las tres fases descritas al inicio de esta parte del artículo, es decir, un mosaico de imágenes cenitales, una corona general de imágenes oblicuas, otras imágenes oblicuas de detalles y un conjunto de imágenes desde la superficie obtenidas con una cámara fotográfica.

El ejemplo que presentamos para la documentación y el modelamiento del tipo 4 es el Templo de la Luna de Machu Picchu, un abrigo o cueva profunda con paredes internas y externas exquisitamente trabajadas, ubicado en la ladera norte de la montaña Huayna Picchu, a espaldas de la Llacta de Machu Picchu, que se modificó para crear las terrazas que se ubican alrededor del abrigo y que crean una plataforma delante de este (Fig. 11). El sitio es de difícil acceso y, consecuentemente, es muy poco visitado, puesto que se ubica en la pendiente pronunciada y boscosa de la montaña Huayna Picchu. Dentro del abrigo se crearon espacios con paredes formadas por piedras finamente labradas, decorados con nichos y pórticos trapezoidales de doble jamba, característicos de la mampostería inca de más abolengo. El registro de este sitio, pequeño pero muy decorado, requirió la aplicación de un registro en las tres fases descritas en los párrafos anteriores.

La documentación se realizó con un dron Phantom 4 Pro, equipado con una cámara de 20 megapíxeles y con una cámara Sony RX100 V de 20.1 megapíxeles. El registro se realizó el 29 de noviembre del 2019 y produjo 378 fotos a alturas variables, que luego de procesadas produjeron una resolución de 2.38 mm/pix. El primer paso en el registro del sitio fue crear un mosaico de imágenes cenitales a muy baja altura, que fue indispensable para situar al sitio en su localización exacta. Estas imágenes permitieron producir por sí mismas ortofotos muy precisas, pero los aspectos verticales estaban muy mal reflejados. Las imágenes oblicuas, tomadas como coronas frente al sitio, a diferentes alturas, permitieron modelar los aspectos verticales de las plataformas y del abrigo, pero el interior del abrigo habría quedado muy mal representado, puesto que ni las imágenes cenitales ni las oblicuas habrían reflejado lo que allí se encontraba. Es muy peligroso para

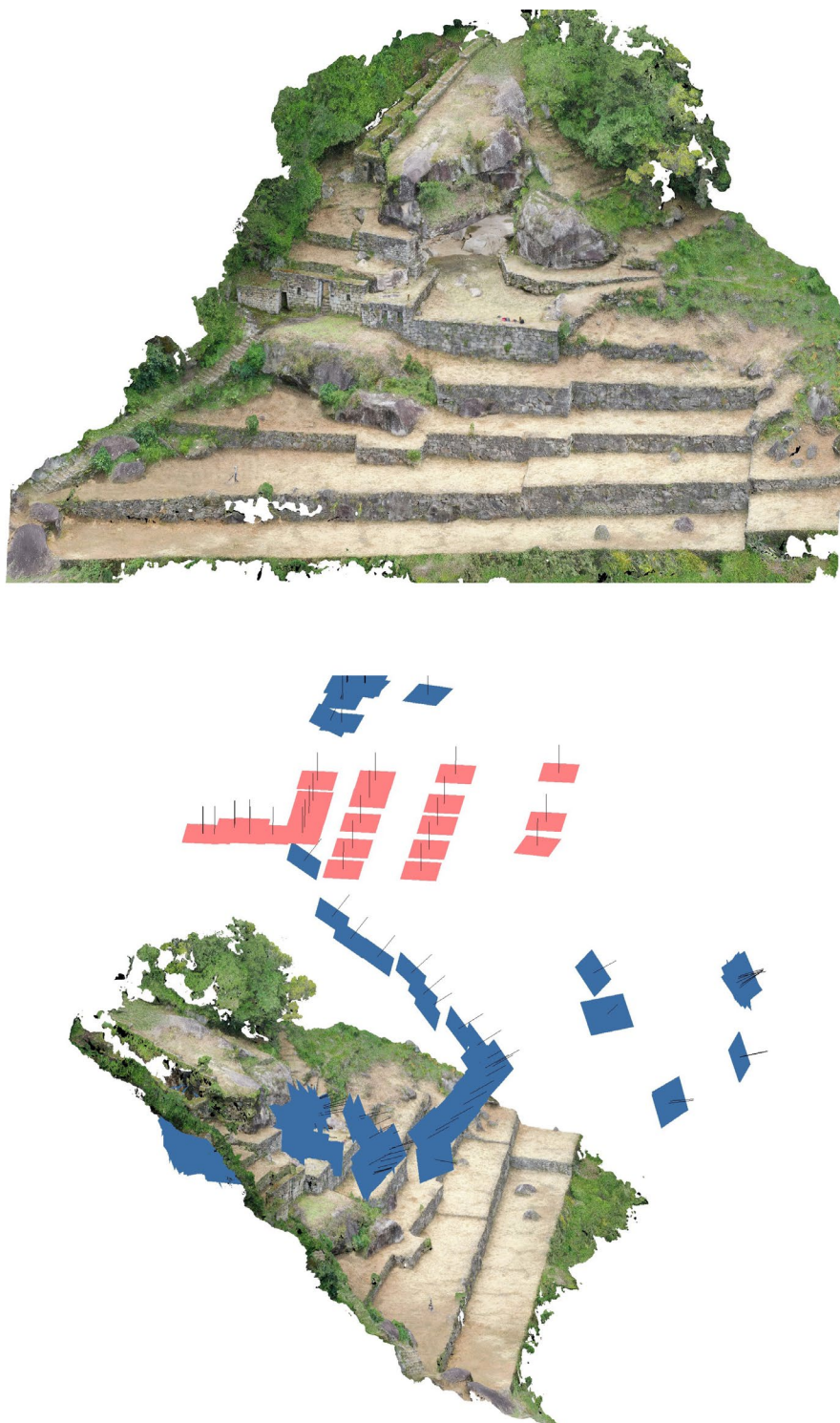


Figura 11. Tipo 4. Modelamiento 3D de sitios de gran complejidad, mayormente mediante imágenes cenitales y oblicuas e imágenes desde la superficie obtenidas con cámaras fotográficas. Templo de la Luna, Huayna Picchu, Cusco (fotografías: Fabricio Servan; modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

un dron ingresar a un espacio tan restringido como un abrigo rocoso, por lo que el tercer paso en el registro consistió en la fotografía detallada del interior del abrigo con una cámara desde la superficie, a muy corta distancia. Este registro fotográfico debe ser tan detallado como el registro realizado con drones, es decir, adhiriéndose a los principios de proximidad y de superposición.

3.5. Tipo 5: modelamiento 3D de sitios en pendientes mediante superficies escalonadas (ejemplos: capital imperial Huari, Ayacucho (Fig. 12); San Ildefonso, valle de Jequetepeque, La Libertad (Fig. 13))

Los tipos de modelamiento descritos hasta aquí están adaptados a sitios que se encuentran sobre superficies o áreas planas, o que tienen una gradiente poco pronunciada. Las diferencias altitudinales que hemos discutido corresponden solo a las alturas de los componentes de los sitios, como en las huacas de la costa, y se resuelven volando a varias decenas de metros por encima de todos los componentes. Los resultados, como hemos visto en los tipos 2, 3 y 4, son muy buenos y no son afectados por las diferencias altitudinales que, más bien, son capturadas a gran detalle en los modelos digitales de elevación (DEM) y en las topografías digitales. No obstante, ¿cuál es la mejor y más eficiente forma de documentar un sitio que se encuentra distribuido en una gradiente pronunciada como, por ejemplo, Pisac, en el Valle Sagrado del Cusco, o el Cerro Saltur en el valle de Lambayeque?

Evidentemente, los métodos descritos hasta aquí, en los que el dron mantiene una altura constante durante el vuelo programado, creando un mosaico de fotos, no son adecuados. Cuando las diferencias son muy grandes o cuando el terreno está inclinado, las variaciones de alturas generan graves alteraciones en la resolución y en la claridad de las imágenes. Creemos que hay tres soluciones para este problema. En primer lugar, lo ideal sería que el dron *siga el terreno* , es decir, que el dron corrija la altitud de forma tal que se encuentre casi siempre a la misma distancia vertical de la superficie. Para este propósito, el programa de planificación de vuelo debe ser alimentado con un modelo de superficie (DSM) a partir del cual se diseñe las alturas de vuelo. Lamentablemente, muchas veces no es posible contar con modelos de superficie suficientemente detallados para planear los vuelos. Una segunda solución es incorporar un altímetro que corrija la altura a medida que el dron se mueva sobre el sitio, manteniendo una altura constante, es decir, siguiendo el terreno. Esta tecnología, que sería la fácil adaptación de un láser, aún no está disponible comercialmente.

Mientras que estos adelantos se van desarrollando y su uso se vaya generalizando, se requerirá volar con una metodología que corrija las variaciones altitudinales de una manera más práctica, que es la que aquí proponemos mediante el uso de múltiples planos escalonados de vuelo. Esta metodología se discutió detalladamente en dos artículos anteriores. En *Documenting archaeological sites on mountains and slopes with drones* (Castillo *et al.* 2018, 2019a) se planteó por primera vez un método en el que se usaban múltiples planos de vuelo, adecuados a las características de la topografía de los sitios para documentarlos con precisión. En *Drones y modelamiento 3D fotogramétrico en la prospección arqueológica* (Castillo Butters y Barrera Yaranga 2023) volvimos a abordar esta metodología de registro cuando aplicamos los métodos de documentación para prospeccionar sitios de gran tamaño, pero que se encuentran en terrenos accidentados, irregulares o en gradiente. A continuación, presentamos dos ejemplos de la aplicación del método de las superficies escalonadas de documentación.

El primer ejemplo del tipo 5 de documentación y modelamiento de un sitio mediante el uso de múltiples superficies escalonadas es la ciudad prehispánica de Huari, capital del imperio del mismo nombre, situada en Ayacucho, al sur del Perú (Fig. 12). El área central de Huari abarca 173 hectáreas y el área total más de 500. El punto más bajo del sitio está ubicado a 2690 metros sobre el nivel del mar y el más alto a 2900 metros sobre el nivel del mar, es decir, la diferencia altitudinal es de 210 metros. Si voláramos este sitio suponiendo que es una superficie plana con arquitectura encima, tendríamos que partir del punto más alto y elevarnos 80 metros, es decir, volaríamos a 3980 metros sobre el nivel del mar. La distancia entre este plano de vuelo y la parte superior

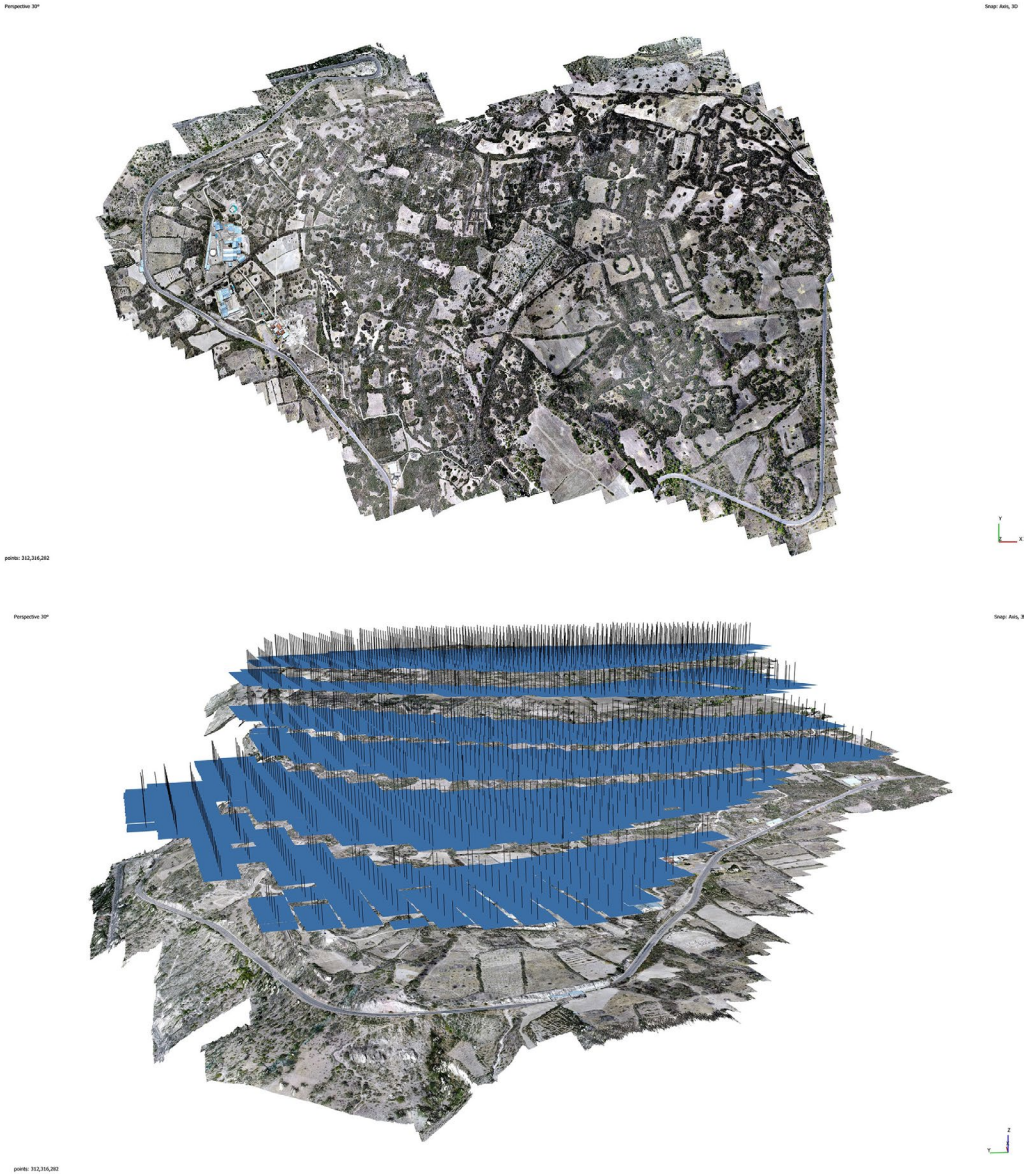


Figura 12. Tipo 5. Modelamiento 3D de sitios en pendientes mediante superficies escalonadas. Capital Imperial Huari, Ayacucho (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

del sitio sería de 80 metros, pero entre este plano de vuelo y la parte más baja sería de 290 metros. Esta diferencia de altura entre el plano de vuelo y el terreno generaría que, en la parte más alta del sitio, la resolución de las imágenes fuera de 2.2 cm/pix, mientras que en la parte más baja sería de 7.9 cm/pix. Como es evidente, esta discrepancia redundaría en una ortofoto donde la resolución sería decreciente a medida que aumenta la altura entre superficie y dron (Castillo Butters y Barrera Yaranga 2023: 101-107).

En la Fig. 12 se puede ver el resultado de la aplicación de esta metodología de escalones en una ortofoto del sitio de Huari con una calidad y resolución constante. La figura presenta los polígonos



Figura 13. Tipo 5. Modelamiento 3D de sitios en pendientes mediante superficies escalonadas. San Ildefonso, valle de Jequetepeque, La Libertad (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

que conforman seis escalones vistos desde una perspectiva oblicua, donde se observa, claramente, la superposición entre escalones. La proyección cenital de las 1961 imágenes permite apreciar que las fotografías están dispuestas uniformemente a lo largo y ancho del sitio. Cada uno de estos polígonos debe ser volado por separado e integrados, posteriormente, en el procesamiento de las imágenes como un proyecto unitario (Castillo Butters y Barrera Yaranga 2023: 101-107).

Un segundo ejemplo del quinto tipo de documentación fue el registro del sitio de San Ildefonso, en el valle de Chamán, región La Libertad (Fig. 13). San Ildefonso es un sitio Mochica Tardío ubicado en el extremo noroeste de la cadena de montañas del mismo nombre, que separan la parte norte del valle de Jequetepeque del mar. El sitio comprende un área de 60 hectáreas y está ubicado en la pendiente sur de las montañas, siendo su altura máxima los 160 metros y su altura mínima los 40 metros, es decir, existe una variación altitudinal de 120 metros. Si bien es perfectamente posible volar un sitio con estas diferencias de altura en un solo vuelo, por ejemplo, a 50 metros del punto más alto, es decir, a 210 metros, el problema que enfrentaríamos es la diferencia de resolución entre la parte superior y la parte inferior. En el caso de San Ildefonso, el objetivo era obtener la mejor resolución posible y la menor distorsión. Luego de varios intentos y ejercicios hechos entre 2011 y 2017, finalmente se logró documentar el sitio por completo mediante el método de las múltiples capas altitudinales, el 28 de julio del 2017. Para este efecto, se hizo una subdivisión en tres polígonos que comprendían las alturas de 40 a 90 metros, 90 a 120 metros y 120 a 160 metros. Cada una de estas áreas fue subsecuentemente volada con un dron Phantom 4 equipado con una cámara de 20 megapíxeles a aproximadamente 50 metros por encima del punto más alto de cada polígono, es decir a 140, 170 y 200 metros. El polígono de 40 a 90 metros produjo 845 fotos, el polígono de 90 a 120 produjo 663 fotos, y el polígono de 120 a 160 produjo 430 fotos cenitales. A estas fotografías cenitales se agregaron algunas imágenes oblicuas de la parte más alta y vertical del sitio. El resultado del procesamiento de 1772 imágenes fue una ortofoto de 1.97 cm/pix de resolución y un DEM de 7.87 cm/pix (Castillo *et al.* 2019a).

3.6. Tipo 6: vuelos especiales (ejemplos: registro exclusivamente en base a imágenes oblicuas: Palacio de Perolnuyoq, Huarocondo, Cusco (Fig. 14); registro planificado con sistema de vuelo de cinco pasadas: Chincana Grande, Saqsaywaman, Cusco (Fig. 15))

En esta categoría incluimos las estrategias de documentación con el uso de drones que escapan a los métodos antes descritos y que son más subjetivas, o cuya eficacia no ha sido demostrada en comparación con los cinco métodos ya expuestos.

En primer lugar, presentamos una forma de documentar un sitio que se basa, exclusivamente, en imágenes oblicuas. En este caso, prescindimos del mosaico de imágenes cenitales que, hasta este momento, hemos indicado como necesario, y lo sustituimos por un enjambre de imágenes oblicuas tomadas desde diferentes ángulos, a diferentes alturas y distancias. Consideramos que esta forma de documentar (no queremos llamarla método, puesto que no es metódica) es más oportunista que planificada. Sin embargo, la hemos puesto en práctica en numerosas ocasiones en las que no era posible, o no era eficiente aplicar un vuelo diseñado y controlado por un programa de planificación de vuelo, que empieza por registrar un mosaico de imágenes cenitales. Por ejemplo, esta forma de registro resulta muy útil cuando se está haciendo una prospección con drones y se encuentra un sitio o algún resto aislado, y cuando se desea obtener un modelo 3D muy rápido, antes de regresar el dron a la base (nos ha pasado con frecuencia en Palpa y Nasca, registrando geoglifos, y en el Cusco). En estas circunstancias, planear un vuelo con el programa de planificación tomaría mucho tiempo y podría distraernos de otras operaciones. Entonces, lo ideal es tratar de hacer una captura de imágenes que cubra lo mejor posible el sujeto, pero sin el auxilio de un autopiloto. También hemos empleado este método en sitios que presentaban un alto riesgo al volarse, por ejemplo, cuando el sitio tiene al lado un macizo rocoso vertical. En casos como este, por ejemplo, en Patallaqta, en el parque de Machu Picchu, es conveniente tener control manual del aparato en todo momento.

La segunda forma de documentar corresponde a un protocolo automático que, frecuentemente, está disponible en programas de planificación de vuelo y al que nos referiremos como vuelo en cinco pasadas. Este es un vuelo planificado que combina, primero, un mosaico de fotos

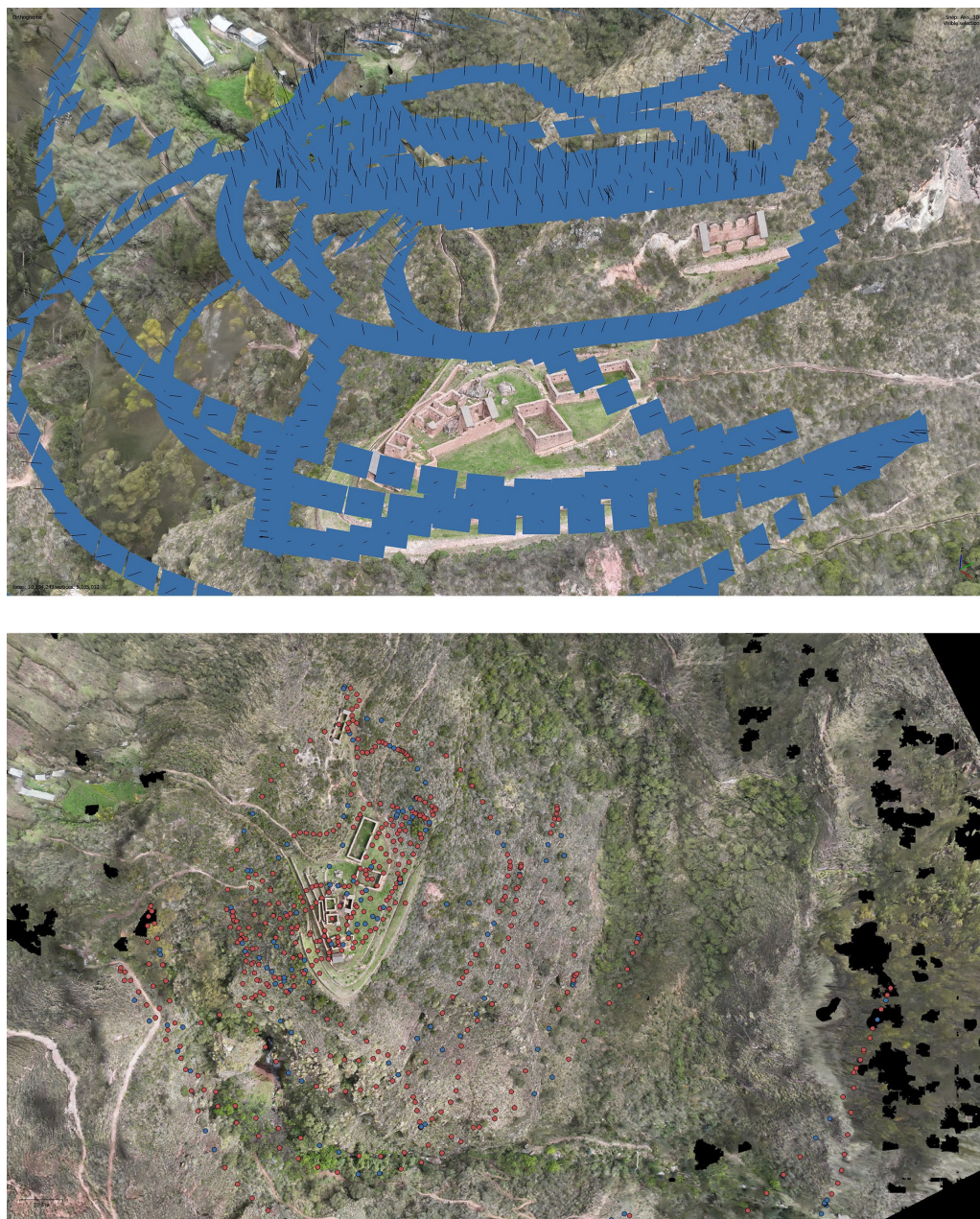


Figura 14. Vuelos especiales. Registro en base a imágenes cenitales formando cinturones alrededor del objetivo tomadas sin la ayuda de programas de planificación de vuelo o autopiloto, y sin mosaico de fotos cenitales. Perolnuyoc, valle de Huarucondo, Cusco (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

cenitales y, acto seguido, cuatro vuelos adicionales desde cada punto cardinal con la cámara en un ángulo oblicuo (definido por el usuario). Para realizar este tipo de documentación es necesario definir el polígono de vuelo, la altura, la superposición vertical y horizontal, así como el ángulo de las imágenes oblicuas. En base a esta información, el programa diseña el vuelo y nos da la opción de realizar cualquiera de las cinco pasadas. El resultado de la aplicación de este vuelo es comparable

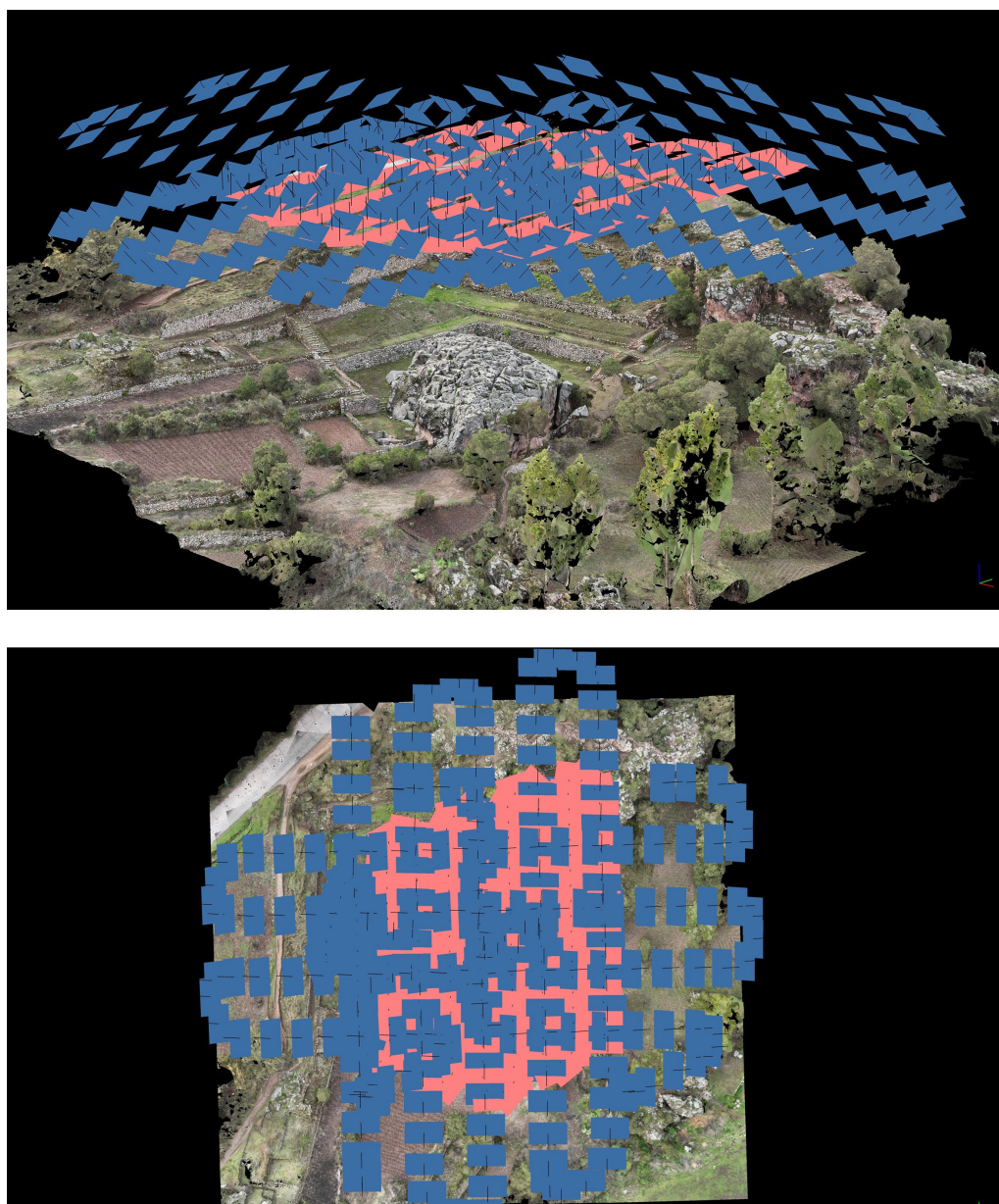


Figura 15. Vuelo especial de cinco pasos. Registro en base a imágenes producidas por el protocolo de vuelo de cinco pasadas (la primera cenital, las demás oblicuas desde diferentes direcciones). Chincana Grande, Parque de Sacsaywaman, Cusco (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

con el tipo 2 descrito más arriba, es decir, un vuelo que combina un mosaico cenital con coronas generales. Sin embargo, un vuelo en cinco pasadas no es comparable con el tipo 3, que agrega coronas más pequeñas alrededor de elementos prominentes o que se quieran enfatizar. Ahora bien, nada impide que estos registros más precisos no puedan agregarse después de que se ha terminado el vuelo en cinco pasadas.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

En las dos partes de este artículo hemos explorado tres temas: primero, la historia de la ilustración arqueológica a través de diferentes técnicas de representación disponibles desde el siglo XV; segundo, la aplicación del modelamiento tridimensional fotogramétrico en la documentación, el registro y la generación de ilustraciones de sitios arqueológicos; y, tercero, las diferentes estrategias y tipos de registro que se pueden aplicar, con o sin drones, para lograr una mejor documentación y modelamiento de estos sitios.

En la primera entrega (Castillo Butters y Barrera Yaranga 2024) hemos visitado las diferentes técnicas de ilustración de *lo arqueológico*, inicialmente, a través de ilustraciones artísticas, dibujos técnicos, fotografías, videos y, solo últimamente, ilustraciones y gráficos generados por computadoras. En esta secuencia, queda claro que los nuevos métodos de modelamiento tridimensional y generación de gráficos son la evolución natural de los métodos de ilustración arqueológica que, seguramente, serán superados en el futuro y que tienen muchos aspectos positivos, pero también limitaciones. Los diferentes métodos de ilustración reflejan el estado del arte en su momento e inevitablemente fueron superados por nuevos métodos que, sin embargo, no dejaron obsoletos ni remplazaron completamente a los que preexistían. Así, las representaciones artísticas de sitios y artefactos arqueológicos, que se iniciaron con la reintroducción de la pintura en el Renacimiento italiano del siglo XV, aún siguen siendo empleadas para realizar ilustraciones artísticas recreativas. El dibujo técnico, de alta precisión y formalidad, a partir del siglo XVIII, es el estándar de representación de artefactos, particularmente, de herramientas de piedra y artefactos pequeños; además, coincide con las necesidades de una creciente industria editorial para la cual las imágenes tenían que provenir de grabados. Por su parte, la fotografía, a partir de su invención a mediados del siglo XIX, es un estándar en la documentación arqueológica y se emplea en varios ámbitos: desde el campo hasta el laboratorio. El video, que se generalizó a inicios del siglo XX, en contraste, nunca tuvo una aplicación extendida en la arqueología, aunque últimamente drones equipados con cámaras de video han permitido extender y popularizar este tipo de registro. Finalmente, los gráficos más recientes generados por computadoras, desde el CAD hasta las imágenes 3D fotogramétricas, han tenido una gran difusión en el trabajo arqueológico a partir del siglo XXI. Esta profusión de métodos de registro e ilustración permite que los arqueólogos de hoy tengan múltiples opciones que pueden adaptar a las condiciones de los sitios, contextos y artefactos, así como a las necesidades de las ilustraciones que requieren. Ninguna forma de registro es mejor que otra, ya que cada una de ellas logra resultados que las otras no podrían.

La aplicación del modelamiento tridimensional fotogramétrico en la arqueología, que es el tema de la segunda parte de este artículo, requiere de una discusión detallada de diversos aspectos de este proceso. En esta entrega, luego de una definición de lo que es la fotogrametría y sus alcances, hemos discutido dos aspectos centrales de la aplicación de la fotogrametría en arqueología: las modalidades de registro que varían en relación con el tipo de bien a registrar (artefactos, contextos, sitios o regiones) y las fases del registro fotogramétrico (planificación, registro y procesamiento). Por lo tanto, se debe considerar que no todo objeto es igual y tanto sus dimensiones como su complejidad geométrica determinan la forma y las herramientas que se emplean para documentarlo. Los artefactos requieren de una documentación muy detallada debido a su tamaño, por lo que en su registro se emplean cámaras fotográficas. Los contextos arqueológicos, ya sea una tumba o una unidad de excavación, requieren de una combinación de imágenes oblicuas a corta distancia que se obtiene con cámaras fotográficas e imágenes cenitales obtenidas con un dron. Los sitios se documentan, casi exclusivamente, con drones, y requieren de diversas estrategias de registro según su forma. Ocasionalmente, para documentar detalles, se emplean fotografías obtenidas por cámaras. Finalmente, la prospección arqueológica de regiones emplea, exclusivamente, drones que vuelan a gran altura para crear mosaicos de imágenes cenitales a partir de las cuales se pueden producir modelos de dos y tres dimensiones (Castillo Butters y Barrera Yaranga 2023).

Cuando la revolución fotogramétrica empezó, y no existía claridad tanto en los procedimientos como en las buenas prácticas, es decir, cuando todos los vuelos se hacían sin la ayuda de programas de planificación de vuelo, no había transmisión de imágenes o información de vuelo (*v.g.*, altura y distancia, consumo de las baterías). Cuando el *software* fotogramétrico todavía estaba en estado incipiente, la documentación fotogramétrica era incierta, los accidentes eran frecuentes, los resultados eran menos que satisfactorios y la precisión de los productos era muy baja. Lo curioso es que esta prehistoria del uso de drones en arqueología y el modelamiento fotogramétrico ocurrió hace solo diez años. Desde entonces, las cosas han cambiado, y ahora, con nuevos equipos y *software*, así como con una amplia experiencia acumulada por numerosos investigadores, es evidente que existen tres etapas claramente definidas: la planificación, el registro, y el procesamiento de la información. La planificación implica, generalmente, el uso de programas de diseño de vuelo y de adquisición de imágenes que controlan todos los aspectos del proceso. En este punto, el reto es que los drones, durante el vuelo, varíen su altura a fin de mantenerse a una distancia constante del suelo y así producir imágenes con la misma resolución. Esto será posible cuando los drones posean altímetros láser que midan y corrijan la altura a medida que el dron avanza. La fase de registro cada vez corresponde más a la ejecución del plan de vuelo, aunque resulta indispensable tener la capacidad de controlar los drones ante circunstancias impredecibles y peligrosas como los ataques de aves o el impacto de campos electromagnéticos invisibles para el ojo humano que, entre otras cosas, puedan anular la orientación del aparato. Todos los drones modernos vienen equipados con sensores anti-colisión, aunque para probar su efectividad habría que generar situaciones de riesgo, lo que no es una buena idea. Finalmente, el procesamiento de la información, que requiere de *software* y de máquinas con gran capacidad de procesamiento, también precisa de mucha experiencia para fijar los parámetros ideales en función de los resultados que se necesiten.

La tercera parte de este artículo es quizá la más práctica y, ojalá, la más útil para los arqueólogos que quieran emplear drones en la documentación de sitios arqueológicos. Esta parte se sustenta en el modelamiento de cientos de sitios grandes o pequeños, de fácil acceso o muy alejados, de geometría simple o muy compleja (compuestos de múltiples componentes arquitectónicos). También se consideran trabajos efectuados bajo diferentes condiciones climáticas y altitudinales: en la costa, sierra y ceja de selva del Perú. Esta experiencia ha permitido que podamos distinguir varios tipos de registro de vuelo y de toma de fotografías adaptadas a las características de los sitios y a los resultados que se esperan obtener en términos de resolución y detalle. Evidentemente, estos tipos son susceptibles de variar a medida que aparezcan equipos con nuevas prestaciones y se añadan otros tipos de registro en función del tipo de sitio sobre el que se vuela. Los arqueólogos que trabajen en el campo tendrán, seguramente, sus propios tipos de vuelos y estrategias de documentación que puedan o no diferir de las que se presentan aquí. El común denominador, en cualquier caso, es la combinación de imágenes cenitales, tomadas con una cámara apuntando directamente hacia abajo, e imágenes oblicuas, con la cámara en un ángulo variable. Las primeras son ideales para obtener productos bidimensionales como ortofotos y modelos de elevación digital (DEM), mientras que las imágenes oblicuas enfatizan los aspectos verticales y son indispensables para los modelos 3D, así como para la topografía digital.

Un último punto que queremos traer a la atención de los lectores es la necesidad de maximizar las medidas de seguridad durante la documentación de sitios. Esto implica tanto la seguridad de las personas y propiedades sobre las que potencialmente se vuela, como de los equipos, así como las regulaciones que norman el uso de los drones en cada jurisdicción, sea nacional, regional o local. La seguridad es esencial en el trabajo con drones, por lo que es importante seguir las recomendaciones de las autoridades correspondientes, particularmente en lo que se refiere a las limitaciones de los vuelos nocturnos o sobre personas, a las prohibiciones de vuelo sobre aeropuertos y zonas restringidas, y a la necesidad de mantener los equipos en perfecto estado. En este punto cabe recalcar que las baterías que usan los drones son de vida limitada y pueden generar problemas si el

equipo se encuentra en el aire. Por otro lado, las baterías contienen elementos tóxicos, por lo que su manejo requiere de condiciones especializadas de descarte. Asimismo, las regulaciones que existen en cada país y localidad pueden ser muy distintas entre sí, por lo que los operadores deben estar siempre atentos a cambios en la legislación o regulación. Siendo una tecnología muy reciente, la legislación en materia de drones es muy sensible a los accidentes u ocurrencias. Así, la mala gestión de riesgos de un individuo puede terminar afectando a toda la comunidad.

Notas

- ¹ <https://www.agisoft.com/downloads/system-requirements/>
- ² <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002439383-Computer-requirements-PIX4Dmapper>
- ³ En las siguientes páginas se puede encontrar información y comparaciones de *software* de fotogrametría: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_photogrammetry_software; <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-software/photogrammetry-software/>

REFERENCIAS

- Al-Ruzouq, R. y S. Abu Dabous (2017). Archaeological site information modelling and management based on close-range photogrammetry and GIS, *Conservation and Management of Archaeological Site* 19 (3), 156-172. <https://doi.org/10.1080/13505033.2017.1343061>
- Castillo, L. J. (2018). Drones y arqueología, vuelos e imágenes, en: R. Chapoulie, M. Sepúlveda, N. del Solar y V. Wright (eds.), *Arqueometría. Estudios analíticos de materiales arqueológicos*, 629-662, Instituto Francés de Estudios Andinos/Université de Bordeaux, Montaigne/Universidad de Tarapacá, Lima. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.13235>
- Castillo Butters, L. J. y H. Barrera Yaranga (2023). Drones y modelamiento 3D fotogramétrico en la prospección arqueológica, *Revista PH* 110, 88-115. <https://doi.org/10.33349/2023.110.5402>
- Castillo Butters, L. J. y H. Barrera Yaranga (2024). Fotogrametría, modelamiento tridimensional y drones en arqueología. Primera parte. La ilustración arqueológica. De la representación artística al modelamiento tridimensional, *Boletín de Arqueología PUCP* 35, 96-121. <https://doi.org/10.18800/boletindearqueologiapucp.202402.005>
- Castillo, L. J., F. Servan y K. Patroni (2019a). Documenting archaeological sites on mountains and slopes with drones, *Advances in Archaeological Practice*, Society for American Archaeology 7(4), 337-352. <https://doi.org/10.1017/aap.2019.35>
- Castillo, L. J., J. Isla, F. Servan y K. Patroni (2019b). The Palpa figures, Were these images created before the Nasca Lines?, *Current World Archaeology Magazine* 95, 16-21.
- Castillo, L. J., J. Isla, F. Servan y K. Patroni (2020). Descubriendo geoglifos antropomorfos del periodo Paracas en Palpa, *Arqueología Mexicana* 162, 80-85.
- Galassi, S., M. Bigongiari, G. Tempesta, L. Rovero, E. Fazzi, C. Azil, L. Di Pasquale y G. Pancani (2022). Digital survey and structural investigation on the Triumphal Arch of Caracalla in the archaeological site of Volubilis in Morocco: retracing the timeline of collapses occurred during the 18th century earthquake, *International Journal of Architectural Heritage* 16 (6), 940-955. <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2045387>
- Harrower, M. J., K. M. O'Meara, J. J. Basile, C. J. Hickman, J. L. Swerida, I. A. Dumitru, J. L. Bongers, C. J. Bailey y E. Fieldhouse (2014). If a picture is worth a thousand words...3D modelling of a Bronze Age tower in Oman, *World Archaeology* 46 (1), 43-62. <https://doi.org/10.1080/00438243.2014.890909>
- Jalandoni, A. y S. K. May (2020). How 3D models (photogrammetry) of rock art can improve recording veracity: a case study from Kakadu National Park, Australia, *Australian Archaeology* 86 (2), 137-146. <https://doi.org/10.1080/03122417.2020.1769005>
- Martínez-Carricondo, P., F. Carvajal-Ramírez, L. Yero-Paneque y F. Agüera-Vega (2020). Combination of nadir and oblique UAV photogrammetry and HBIM for the virtual reconstruction of cultural heritage. Case study of Cortijo del Fraile in Níjar, Almería (Spain), *Building Research & Information* 48 (2), 140-159. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1626213>

- Masson-Maclean, E., J. O'Driscoll, C. Mciver y G. Noble (2021). Digitally recording excavations on a budget: a (low-cost) DIY approach from Scotland, *Journal of Field Archaeology* 46 (8), 595-613. <https://doi.org/10.1080/00934690.2021.1970444>
- O'Driscoll, J. (2019). Picture perfect: using drone technology and photogrammetry techniques to map the western stone forts of Ireland, *Journal of Field Archaeology* 44 (2), 126-146. <https://doi.org/10.1080/00934690.2019.1570580>
- Olson, B. R., R. A. Placchetti, J. Quartermaine y A. E. Killebrew (2013). The Tel Akko total archaeology project (Akko, Israel): assessing the suitability of multiscale Abate 3D field recording in archaeology, *Journal of Field Archaeology* 38(3), 244-262. <https://doi.org/10.1179/0093469013Z.00000000056>
- Roosevelt, C. H. (2014). Mapping site-level microtopography with Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite Systems (RTK GNSS) and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry (UAVP), *Open Archaeology* 1, 29-53. <https://doi.org/10.2478/opar-2014-0003>
- Sapirstein, P. (2016). Accurate measurement with photogrammetry at large sites, *Journal of Archaeological Science* 66, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.01.002>
- Scott, C. B., C. H. Roosevelt, G. R. Nobles y C. Luke (2021). Born-digital logistics: impacts of 3d recording on archaeological workflow, training, and interpretation, *Open Archaeology* 7, 574-588. <https://doi.org/10.1515/opar-2020-0150>
- Šedina, J., M. Hůlková, K. Pavelka y K. Pavelka Jr. (2019). RPAS for documentation of Nazca aqueducts, *European Journal of Remote Sensing* 52 (1) 174-181. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1537684>
- Van Valkenburgh, P., K. C. Cushman, L. J. Castillo, C. Rojas, C. Roberts, C. Kepler y J. Kellner (2020). Lasers without lost cities: using drone-mounted LiDAR to capture architectural complexity at Kuelap, Amazonas, Peru, *Journal of Field Archaeology* 45 (51), 575-588. <https://doi.org/10.1080/00934690.2020.1713287>
- Wernke, S. A., G. Ore, C. Hernández, A. Rodríguez, A. Traslaviña y G. Marcone (2017). beyond the basemap: multiscalar survey through aerial photogrammetry in the Andes, en: E. Walcek Averett, J. M. Gordon y D. B. Counts (eds.), *Mobilizing the past: recent approaches to archaeological fieldwork in the digital age*, 147-163, The Digital Press at the University of North Dakota/Mukurtu 2.0 (Center for Digital Archaeology), Grand Forks.

Recibido: Marzo 2024

Aceptado: Enero 2025