

# ESTABLECIMIENTO DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN EN YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS MEDIANTE UAVS ESTUDIO DE CASO: CERRO CATEQUILLA

*Iván Fernando Palacios Orejuela<sup>1</sup> y César Alberto Leiva González<sup>2</sup>*

## • RESUMEN •

Los drones combinados con técnicas de fotogrametría aérea permiten reconstruir tridimensionalmente la superficie de un sitio arqueológico de forma rápida y precisa. El Cerro Catequilla en Ecuador es parte del patrimonio arqueológico nacional, cuya importancia radica en que se encuentra atravesado por el Ecuador. Sin embargo, este sitio único presenta un claro deterioro. El objetivo fue demostrar y establecer el estado de conservación, mediante drones, como una alternativa óptima y efectiva aplicado a yacimientos arqueológicos. Mediante un levantamiento geodésico se colocaron puntos de apoyo fotogramétrico para el procesamiento de imágenes capturadas con un drone *Phantom 4*. Con los productos fotogramétricos generados se determinaron características morfológicas y geométrica muy precisas de las ruinas y daños antrópicos recientes como excavaciones, construcciones abandonadas y el 60% de las ruinas destruidas. Además, gracias al uso del drone fue posible conservar y registrar en digital la historia del sitio con un alto grado de detalle.

*Palabras clave: estado de conservación; fotogrametría aérea; levantamiento geodésico; ecuador; patrimonio arqueológico.*

# ESTABLISHMENT OF THE STATE OF CONSERVATION IN ARCHAEOLOGICAL SITES BY UAVS STUDY CASE: CERRO CATEQUILLA

## • ABSTRACT •

Drones combined with proper aerial photogrammetry techniques reconstruct quickly and accurately the three-dimensional surface of an archeological site. The Cerro Catequilla is part of the national archaeological heritage in Ecuador, whose importance lies in the fact that it is crossed by the equator. However, this unique site has a clear deterioration. The objective was to demonstrate and establish the conservation status, using drones, as an optimal and effective alternative applied to archaeological sites. Through a geodesic survey, photogrammetric support points were placed for the processing of images captured with a Phantom 4 drone. With the photogrammetric products generated, very precise morphological and geometric characteristics of the ruins and recent anthropic damage such as excavations, abandoned buildings and 60% of the destroyed ruins were determined. In addition, thanks to the use of the drone it was possible to preserve and digitally record the history of the site with a high degree of detail.

*Keywords: conservation status; aerial photogrammetry; geodesic survey; equator; archaeological heritage.*

<sup>1</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Sangolquí, Ecuador. E-mail: ifpalacios@espe.edu.ec

<sup>2</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Sangolquí, Ecuador. E-mail: caleiva@espe.edu.ec

Recibido en el mes de agosto de 2019. Aceptado en el mes de noviembre de 2019.

Palacios Orejuela, I. F. y Leiva González, C. A. (2019) Establecimiento del estado de conservación en yacimientos arqueológicos mediante UAVs, estudio de caso: Cerro Catequilla. *La Zaranda de Ideas Revista de Jóvenes Investigadores* 17(2): 6-20.

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA)

## INTRODUCCIÓN

La arqueología moderna permanece como disciplina desde el siglo XIX, y gracias al avance de otras ciencias como antropología, lingüística, sociología, medicina, química, biología, geología, geografía, entre otras, ha madurado y progresado desde sus comienzos. Precisamente, fue la geografía la que proporcionó un gran salto en la arqueología, con la aparición de la fotografía aérea digital, fotogrametría y restitución, en conjunto con las técnicas de levantamiento manual (Pérez *et al.* 2019). Sin embargo, el dibujo o trazado de los objetos en el campo evolucionó fundamentalmente desde la irrupción de las herramientas digitales combinadas con algoritmos que mejoraron el procesamiento y calidad de la fotografía, y posibilitaron la generación de modelos en 3D con un alto grado de detalle.

Las aplicaciones tecnológicas que se han llevado a cabo en arqueología son muchas, lo cual condujo a la UNESCO a conceptualizar el término *digital heritage* (patrimonio digital) que consiste en la generación o conversión a formato digital de los recursos patrimoniales (Quinto 2016), además de otras iniciativas internacionales como la Carta de Londres, Carta de Ename, o los Principios de Sevilla. Sumadas estas iniciativas aportan criterios técnicos a la preservación e incentivo de estas nuevas herramientas relacionadas al patrimonio arqueológico (Pierrot *et al.* 2011). Instituciones como CIPA (*International Committee for Architectural Photogrammetry*), ISPRS (*International Society for Photogrammetry & Remote Sensing*), ICOMOS (*International Council for Monuments and Sites*), ICOM (*International Center for the Conservation and Restoration of Monuments*), UIA (*International Union of Architects*), entre otras, han contribuido en el mejoramiento de las metodologías de virtualización del patrimonio cultural (Yilmaz *et al.* 2007).

Los drones han demostrado ser una herramienta versátil, precisa y accesible que permitió realizar aportes significativos a la arqueología (Rodríguez 2017; Tapete 2019). Un drone, VANT (vehículo aéreo no tripulado), UAV (*unmanned aerial vehicle*) o RPAS (*remotely*

*piloted aircraft system*) (Fernández y Gutiérrez 2017a), son aeronaves sin piloto manejadas por control remoto desde tierra o de forma automática a través de un plan de vuelo previamente planificado y georreferenciado (Pacheco 2017), con capacidad para volar a poca altura y comunicarse en tiempo real con la estación que lo controla (Austin 2010; Next y Remondino 2014).

A través de drones y basados en principios de fotogrametría digital, es posible generar modelos tridimensionales con imágenes tomadas desde distintas posiciones de forma secuencial. Esta técnica se conoce como *Structure from Motion* (SfM), la cual ha sido empleada exitosamente con los UAV en diversos trabajos (Eisenbeiss 2004; Lambers y Remondino 2007; Brutto y Meli 2012; Gruen *et al.* 2012; Haubeck y Prinz 2013; Daftry *et al.* 2015). Las aplicaciones de los VANT son muy diversos, desde el cambio de cobertura del suelo en ciudades (Ma *et al.* 2013), variaciones del uso de suelo (Musakwa y Van Niekerk 2015), control de áreas naturales (Ballari *et al.* 2015; Ramírez *et al.* 2015; Mandujano *et al.* 2017), evaluación del tráfico vehicular (Salvo *et al.* 2014), creación de planos catastrales (Soto 2016), búsqueda y rescate (Addati y Lance 2014), generación de cartografía (Remondino *et al.* 2011; Sani *et al.* 2015), agricultura de precisión (Castro *et al.* 2011; Peña *et al.* 2014; Torres *et al.* 2014; Díaz 2015), estudios geológicos (Fernández y Gutiérrez 2016), minería (Fernández y Gutiérrez 2017b) mantenimiento de líneas eléctricas (Cuerno 2015), y muchas más.

En arqueología se han realizado algunos estudios con drones. Principalmente, en lo que refiere a Latinoamérica, se destacan los trabajos en países como Perú, en los sitios arqueológicos de Pachamacac (Lasaponara *et al.* 2016), Palma (Pavelka *et al.* 2018), Chavín, Chankillo, Cajamarquilla, Huaca La Luna y construcciones coloniales, con un registro de 700 sitios arqueológicos levantados solo en el 2016 (Quinto 2016). Otros países que destacan en el uso de VANT son: México (Stal *et al.* 2014; Kabata *et al.* 2016; Acosta *et al.* 2017; Friedman *et al.* 2017), España (Ortiz 2013; Díaz *et al.* 2015; Fernández y Gutiérrez 2017a, 2017b), Italia (Verhoeven

2009) y Egipto (Lorenzon *et al.* 2013; Gehmlich y Block 2015; Urcia *et al.* 2018), por mencionar algunos.

En Ecuador existen pocos ejemplos del uso de esta herramienta a pesar de la gran riqueza arqueológica del país, donde Cuenca ha sido la ciudad que más trabajos ha mostrado, como por ejemplo en el sitio arqueológico de Todos los Santos (Resco *et al.* 2018), Casa de Chaguarchimbana, Casa Aqlla Wuasi y Pumapungo (Pacheco 2017), así como en edificaciones patrimoniales (Montero *et al.* 2017).

En este estudio de caso se presenta el Cerro Catequilla, el cual es un complejo arqueológico ubicado en la capital de los ecuatorianos y que ha llamado la atención de investigadores por su ubicación particular sobre la línea equinoccial convencionalmente aceptada, lo que le convirtió en un sitio idóneo para la observación de cuerpos celestes (Cobo 2012) y, por ende, su importancia para la cosmovisión de los pueblos antiguos de esta parte del país. El yacimiento arqueológico ha sido objeto de algunos proyectos enfocados al turismo (Maldonado 2011; Guillén 2013; Rivera 2018), pero muy pocos o ninguno en cuanto al uso de drones para la determinación del estado de conservación de sus ruinas arqueológicas, mediante un levantamiento fotogramétrico que permita un alto grado de detalle de las características geométricas y morfológicas del sitio, de una forma rápida, precisa y de más bajo coste, en comparación a otras técnicas que requieren una cantidad excesiva de imágenes (fotogrametría terrestres), o gran espacio de almacenamiento (escáner láser), que dificultan el procesamiento de la información y por lo tanto, el levantamiento arqueológico.

Con esta premisa, el objetivo del trabajo fue demostrar y establecer el estado de conservación de yacimientos arqueológicos, mediante UAVs, como una posible alternativa práctica y eficiente relacionada a trabajos arqueológicos, aplicado al estudio de caso en el Cerro Catequilla.

## SITIO BAJO ESTUDIO

El Cerro Catequilla se encuentra ubicado en la parroquia San Antonio de Pichincha, al nororiente de la ciudad de Quito, Ecuador. En la época de la colonia se

conocía a este sector con el nombre de Lulumbamba y comprende una planicie regular en la que resalta la montaña de Catequilla. Dicho cerro limita al este con la hacienda Vindobona y con el río Guayllabamba, al sur con una pequeña cadena montañosa llamada Jarata y Pacpo, al norte con una prolongación montañosa denominada La Providencia y al oeste con el asentamiento actual de la parroquia. La topografía de la elevación es pronunciada hacia los costados (entre 60% - 75%), y en la cumbre entre 5% - 15% de inclinación.

Su cima registra una altitud de 2638 msnm de acuerdo al vértice geodésico de la Carta Topográfica (1:25000) ÑII-F3c de Puéllaro elaborada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) en el año de 1989. En la parte superior se encuentra una explanada de 3 ha aproximadamente, de la que el complejo arqueológico abarca 1 ha (Cobo 2017). Este sitio forma parte del inventario del Instituto Nacional del Patrimonio Cultural (código Z2F3-047) (Camino 2004), y está conformado por un disco de piedra (Figura 1) llamado disco lítico y una pared semicircular de piedras.

La singularidad que presenta este sitio arqueológico, es que se encuentra ubicado en la latitud cero (Cobo 2004), el cual fue construido hace cientos de años y es atribuido a la cultura Quitu - Caranqui, según las excavaciones realizadas por el arqueólogo Oswaldo Tobar en 1998. Para Cobo (2017), Catequilla tuvo una funcionalidad de observatorio de la bóveda celeste, además de ser un punto estratégicamente edificado en relación a los solsticios y equinoccios, de lo que se infiere un conocimiento de los pobladores del altiplano ecuatoriano de su lugar en el espacio y de la importancia del seguimiento de los astros para su cultura.

## METODOLOGÍA

### • Levantamiento geodésico

En primera instancia se planificó un posicionamiento satelital mediante el método estático diferencial de un punto base, y una densificación de puntos de verificación o *checkpoints* (CP) y puntos de control terrestre (GCP) a través del método diferencial de fase RTK (*Real Time Kinematic*). Para esto, se trabajó con dos antenas GNSS doble frecuencia ( $L_1/L_2$ ), marca *Topcon HiPer V*

FIGURA 1. Disco de piedra o disco lítico del Cerro Catequilla. □



(Topcon 2017), una sirvió de base y la otra de móvil (o rover). El punto base fue colocado sobre el mojón construido por el IGM (Figura 2), el mismo que se encuentra en el centro de la pared semicircular del yacimiento, pero lastimosamente la placa de inscripción del punto se encuentra destruida. El intervalo de grabación de datos fue de un segundo durante un periodo de dos horas.

Los GCP fueron colocados en puntos distribuidos en el área a levantar con la ayuda de marcas de tierra (también llamados *paineles* o *land mark*) para facilitar su visualización desde el aire. Al igual que los anteriores, los CP fueron colocados sobre objetos fotointermedios. Los primeros puntos sirvieron para el ajuste del bloque fotogramétrico, mientras que los segundos ayudaron en el control de la precisión en la ortofotografía generada. En total se posicionaron catorce puntos mediante RTK con intervalos de grabación cada cinco segundos. Los métodos de posicionamiento usados, garantizan una precisión relativa de  $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$  en horizontal y  $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$  en vertical para el punto base, que fue observado mediante un estático diferencial, mientras que los GCP y CP, obtenidos a través de RTK, se logran precisiones de  $2 \text{ cm} \pm 2 \text{ ppm}$  (Seeber 2003).

Para el post procesamiento de los datos se usó el software *Trimble Business Center* (TBC) versión 3.90, en el que se ingresaron los datos de la estación de monitoreo continuo EPEC ubicada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la misma que es parte de Red Geodésica Nacional del IGM (REGME), además de pertenecer a la red SIRGAS. El sistema de referencia con el que se trabajó fue WGS84, datum SIRGAS – ITRF2008, época 2016,44. Las coordenadas resultantes de los puntos obtenidos se muestran en la Tabla 1, y en la Figura 3 se presenta parte del trabajo realizado en campo.

- **Plan de vuelo fotogramétrico**

La elaboración del plan de vuelo previo a la captura de imágenes es de vital importancia (Cowley *et al.* 2017), ya que a través de éste se determinan las características del vuelo que realizará el dron, como son la altura de vuelo, el número de imágenes, el traslape, ángulo de toma, tiempo estimado del vuelo, entre otros parámetros (Arcusa *et al.* 2015). En este estudio se utilizó la aplicación *Pix4D Capture* con dos grillas de vuelo distintas, una simple y una doble.

FIGURA 2. Punto base del levantamiento geodésico.



- **Toma de imágenes con dron**

La captura de imágenes fue realizada mediante un dron de ala rotatoria marca *DJI* modelo *Phantom 4*. Este UAV posee una velocidad máxima de 29 m/s; su autonomía de vuelo es de aproximadamente 28 minutos; rastrea satélites GPS/GLONASS; la precisión vertical es de  $\pm 0,1$  m, y  $\pm 0,3$  m en horizontal con posicionamiento visual; tiene estabilización Gimbal en sus tres ejes: cabeceo, alabeo y guiñada (*pitch, roll, yaw*); un sensor 1/2,3" CMOS y una cámara de 12,4 mpx (DJI 2017). La técnica SfM fue aplicada en ambas grillas.

En los dos vuelos fotogramétricos realizados, se trabajó en función del vuelo con doble grilla, ya que, en la etapa de procesamiento, la calidad de los productos fue mejor al aumentar el solapamiento y número de imágenes, con mayores cantidades de puntos comunes entre las líneas de vuelo. Así se redujeron las deformaciones causadas por el lente de la cámara o la distorsión radial (James y Robson 2014; Herrmann *et al.* 2018).

- **Procesamiento y generación de productos**

La etapa de procesamiento de las imágenes tiene como fin la obtención un arreglo de imágenes ordenadas y

corregidas matemáticamente, denominado bloque fotogramétrico, el mismo que en este estudio se utilizó el *software Agisoft PhotoScan* para su desarrollo. El ajuste del bloque fotogramétrico se basa en la ecuación de colinealidad (Kraus 2007). Además, las transformaciones que se realizan para la obtención del modelo en 3D requieren de la orientación interna y externa de las imágenes (Chiabrando *et al.* 2018). Esto se puede lograr de tres formas: a) mediante una georreferenciación directa con técnicas GNSS; b) si se conoce el sistema de medida inercial (IMU) durante el vuelo fotogramétrico realizado; y c) mediante GCP para una georreferenciación indirecta (este último fue el método escogido) (Agudo *et al.* 2018; Berquist *et al.* 2018).

Generalmente, los drones poseen sistemas de posicionamiento incorporados de baja precisión y susceptibles a más problemas de rastreo, como el efecto *multipath*, altos valores de VDOP, HDOP y PDOP, efectos ionosféricos, entre otros, que pueden propagar los errores en los resultados finales hasta  $\geq 10$  m (Lerma 1999; Kraus 2007). Además, para una correcta geometría del centro de proyección de la imagen se debe determinar la orientación relativa y absoluta, y así es-

**TABLA 1.** Elenco de coordenadas planas proyectadas en UTM 17 Sur.

ESTE (M)	NORTE (M)	ALTURA ELIPSOIDAL (M)	DESCRIPCIÓN
786248,584	10000022,997	2637,767	Base
786204,06	9999978,379	2635,053	GCP
786194,781	10000025,695	2634,475	GCP
786200,472	10000073,421	2632,905	GCP
786235,378	10000072,409	2634,034	GCP
786299,992	10000073,496	2629,193	GCP
786309,942	10000016,27	2631,01	GCP
786302,093	9999965,76	2632,151	GCP
786246,988	9999969,365	2634,208	CP
786205,699	9999994,246	2635,142	CP
786239,729	10000020,368	2635,785	CP
786215,628	10000066,637	2634,454	CP
786257,022	10000056,436	2635,184	CP
786294,457	9999994,366	2633,089	CP
786288,091	9999986,808	2631,655	CP

**FIGURA 3.** Obtención de CP y GCP con RTK.

tablecer al objeto en su posición y forma real (Lerma 2002).

El primer paso dentro del *software* fue realizar la orientación relativa de las imágenes una respecto de otra, y posteriormente se generó la nube de puntos dispersa, la cual es el resultado de la alineación e identificación de puntos comunes entre éstas imágenes (Figura 4).

A continuación, se creó la malla sobre la cual se generará la nube densa de puntos, por lo que se utilizó la más alta precisión posible en el procesamiento. El paso siguiente fue cargar los GCP y pinchar cada uno de estos en todas las imágenes que los contenían. Una vez hecho esto, se procedió a optimizar el alineamiento de la cámara, es decir, al cálculo de los parámetros de alineación de los ángulos de giro en sus tres ejes. Finalmente se generó la nube densa de puntos, con la cual fue posible observar la reconstrucción tridimensional del sitio arqueológico como se muestra en la Figura 5.

Con la nube de puntos densa, se elaboró el modelo digital del terreno (DTM) y de superficie (DSM) mediante un filtrado de puntos, para lo cual se utilizó y comparó dos *softwares* que fueron *Agisoft PhotoScan* y *Global Mapper v18.0*. La última fase del procesamiento de datos fue la obtención de la ortofotografía, la cual se

realizó a partir de los subproductos anteriores y se fijó el tamaño de pixel en 3 cm.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El DTM y DMS fueron generados en los dos *softwares* mencionados, sin embargo, con *Agisoft PhotoScan* se obtuvo mejores resultados, como se puede apreciar en la Figura 6.

Con la ayuda del DTM fue factible observar claramente la existencia de daños provocados en las ruinas, como excavaciones e incluso una construcción abandonada dentro del sitio arqueológico (Figura 7), cuyas características geométricas pudieron ser fácilmente determinadas con ayuda de las herramientas dentro de un sistema de información geográfica (SIG).

La excavación, por sus dimensiones y forma, pudo deberse a la extracción de material pétreo o tierra, la misma que se encontró a escasos catorce metros de la pared semicircular. También se evidenció la acumulación de rocas a su alrededor, las cuales posiblemente formaron parte de las ruinas. Además de esta excavación, se identificaron tres huecos a los costados oeste, este y norte del sitio, que por su poca longitud y profundidad (no más de dos metros), parecen cavados por los llamados huaqueros.

FIGURA 4. Nube de puntos dispersa obtenida.

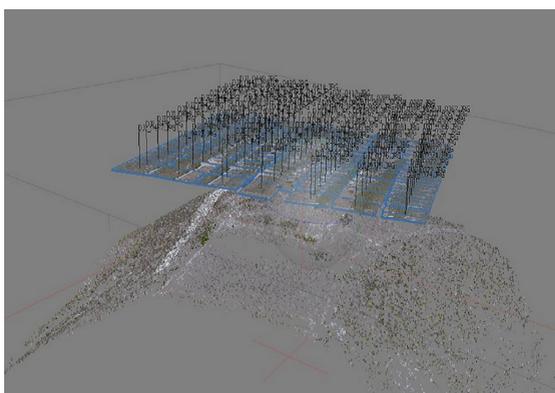
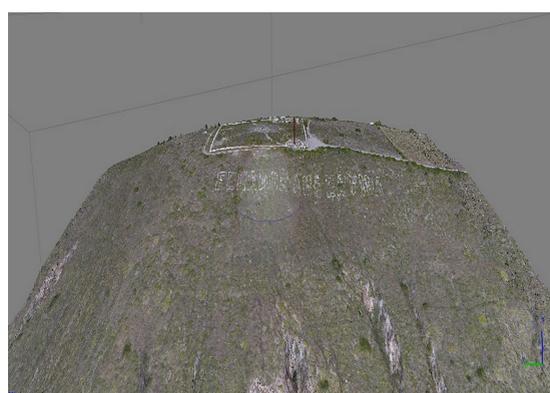


FIGURA 5. Vista lateral del modelo 3D generado del Cerro Catequilla.



De igual forma, gracias al DTM fue posible obtener datos sobre el volumen y desniveles existentes. En cuanto a la altura de la pared semicircular, se estimó entre 1 – 1,5 m de altura en función a las curvas de nivel del sitio (Figura 8); además, las dimensiones del disco lítico y la pared semicircular fueron obtenidas, con un resultado de 8 m y 64 m de diámetro respectivamente, lo cual concordó con los estudios de Cobo (2012; 2017).

Para comprobar la precisión de la ortofotografía generada se aplicó el Protocolo de Fiscalización dado por el IGM (2017), el cual se basa en el test *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA), que trabaja en función del error cuadrático medio (RMSE) para la estimación de la exactitud posicional, RMSE de las componentes, y la exactitud posicional tanto horizontal como vertical, con un nivel de confianza del 90% (NSDI 1998). Los resultados de la precisión del producto cartográfico fueron de 5,268 cm en la componente horizontal y 4,335 cm en vertical, que denota la precisión de los productos obtenidos y que aprueban los límites permitidos por el protocolo del IGM para pro-

ductos cartográficos.

Con la ortofotografía obtenida se pudo apreciar toda la extensión del sitio arqueológico, y constatar que el mismo se encuentra descuidado, con una cubierta de maleza sobre casi todo el terreno. En el costado sureste se apreció la acumulación de rocas que presumiblemente podrían haber formado parte de la pared semicircular original, cuya construcción se encuentra destruida en un 60%. No obstante, el disco lítico muestra un buen estado de conservación. Las afectaciones al sitio arqueológico ponen en descubierto el grado de descuido y paupérrimo estado de conservación de las ruinas, ya sea por mala intención de los visitantes o una clara apatía de las autoridades responsables con la protección del patrimonio arqueológico del Ecuador.

En base a los resultados de las coordenadas obtenidas en el posicionamiento geodésico, se comprobó que el Cerro Catequilla se ubica sobre la línea ecuatorial actual convencionalmente aceptada, lo que señalaría que los pueblos preincas ya poseían un entendimiento de geografía, astronomía y que los cuerpos celestes jugaban un papel importante en su cosmovisión.

FIGURA 6. Comparación entre DTM: izq. *Global Mapper*, der. *Agisoft PhotoScan*.

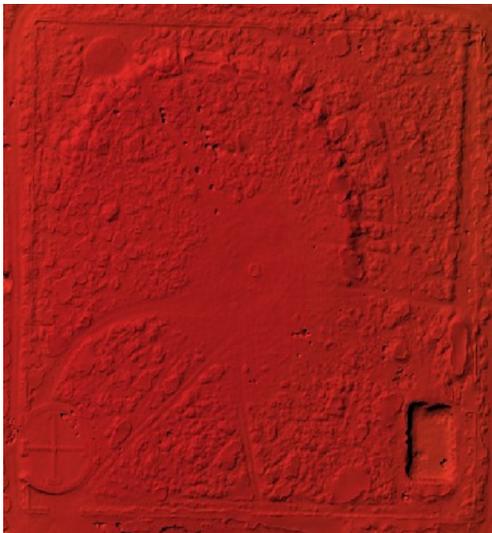
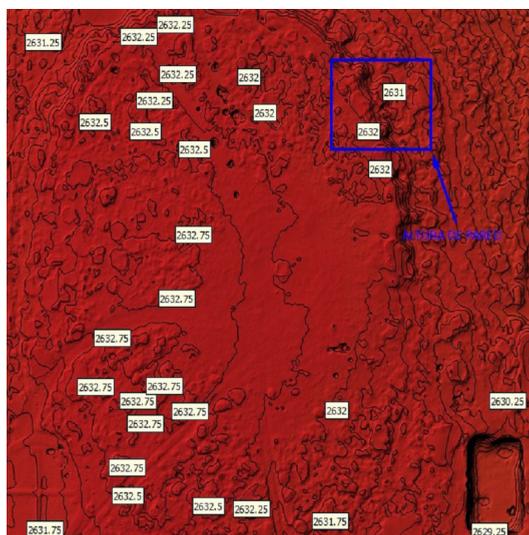


FIGURA 7. Izq. construcción abandonada, der. excavación junto a pared semicircular.



FIGURA 8. Estimación de la altura de la pared semicircular con los productos del DTM.



Los resultados alcanzados muestran que la fotogrametría aérea a través de drones, aplicados al campo de la arqueología es una opción óptima, de bajo coste, accesible y sencilla de utilizar para la actualización del estado de conservación en sitios arqueológicos (Pajas y Oliván 2012; Fiorillo *et al.* 2013; Hill 2019), no solo en la etapa de prospección sino en todo el levantamiento arqueológico, ya que esto implica la posibilidad de mantener el registro inicial del yacimiento, al contrario de la excavación como tal, que es un procedimiento destructivo (Carvajal *et al.* 2019).

Al obtener ortofotografías y, más aún, modelos digitales en 3D, posibilita al arqueólogo volver atrás para la reconstrucción u observación de detalles sin haber intervenido directamente sobre el sitio (Waa-gen 2019). Además, esta herramienta brinda la oportunidad de musealizar los yacimientos arqueológicos (Criado y Barreiro 2013) y difundirlos en la internet para su interpretación, conservación (Querol 2010) y como herencia a las futuras generaciones de la riqueza arqueológica del Ecuador.

Un punto a destacar es que, mediante esta metodología de trabajo, se pudo obtener la geometría y morfología de las estructuras existentes con gran precisión y sin la necesidad de una prospección de campo previa, con resultados muy parecidos, y hasta iguales, a los estudios en que se realizaron actividades *in situ*. Los resultados obtenidos en el estudio ratifican y proporcionan un gran precedente para el uso y potencialización de las nuevas herramientas geoespaciales en este campo de la ciencia.

## CONCLUSIONES

La fotogrametría aérea con plataformas no tripuladas es una herramienta precisa, óptima y accesible para los trabajos arqueológicos con mayores ventajas que otros métodos como láser o fotogrametría terrestre los cuales tienen menor capacidad para la captura de superficie y su trabajo es más dispendioso en tiempo y costo que la fotogrametría aérea a través de drones.

Mediante los productos generados con el dron se pudo determinar el estado de conservación actual del Cerro Catequilla, el cual se encuentra en malas condiciones, ya sea por el desconocimiento, mala intención

o falta de responsabilidad de las autoridades competentes.

La calidad de los productos fotogramétricos obtenidos es sumamente elevada y proporcionó un alto grado de exactitud en la obtención de detalles geométricos y morfológicos de las ruinas arqueológicas, que se comparan con los obtenidos en campo y aportan información relevante en todas las etapas del levantamiento arqueológico.

Gracias a la obtención del modelo 3D, así como su DTM, DSM y ortofotografía es posible preservar el sitio arqueológico en formato digital para su interpretación, estudio, registro y como una forma llamativa hacia las futuras generaciones, que en su momento apreciarán y cuidarán la riqueza arqueológica que posee el Ecuador.

## BIBLIOGRAFÍA

**Acosta, G., E. McClung, G. Jiménez y V. García**

2017. El empleo de fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT/dron) como herramienta de evaluación del patrimonio en riesgo: chinampas arqueológicas de Xochimilco. *Revista Española de Antropología Americana* 47: 185-197.

**Addati, G. y G. Lance**

2014. Introducción a los UAVs, Drones o VANTs de uso Civil. *CEMA Working Papers: Serie Documentos de Trabajo* 551.

**Agudo, P., J. Pajas, F. Pérez, J. Redón y B. Lebrón**

2018. The Potential of Drones and Sensors to Enhance Detection of Archaeological Cropmarks: A Comparative Study Between Multi-Spectral and Thermal Imagery. *Drones* 2(3):29.

**Arcusa, H., M. Rojo, J. Royo, C. Tejedor, I. García y R. Garrido**

2015. La Fotogrametría como alternativa al registro de materiales arqueológicos: su aplicación en la Cueva de Els Trocs y Valmayor XI. *I Congreso CAPA, Arqueología y Patrimonio Aragonés, Sesión 1. Prehistoria y Arte Rupestre*. 533-539. Zaragoza.

- Austin, R.**  
2010. *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Ballari, D., E. Acosta, A. Espinoza, D. Orellana, V. Morocho, M. Martin y U. Torsten**  
2015. Análisis de imágenes UAV de las Islas Galápagos. *Revista Geoespacial* (12): 26-37.
- Berquist, S., G. Spence, F. Gonzalez, B. Rizzuto, W. Álvarez, S. Bautista y J. Jennings**  
2018. A New Aerial Photogrammetric Survey Method for Recording Inaccessible Rock Art. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 8: 46-56.
- Brutto, M. y P. Meli**  
2012. Computer vision tools for 3D modelling in archaeology. *International Journal of Heritage in the Digital Era* 1 (1): 1-6.
- Camino, B.**  
2004. *Evaluación y registro de las áreas mineras ubicadas en los alrededores de San Antonio de Pichincha, Quito, Provincia de Pichincha*. Preparado para Congeminpa Cia. Ltda., Informe al Instituto Nacional del Patrimonio Cultural, Quito.
- Carvajal, F., A. Navarro, F. Agüera, P. Martínez y F. Mancini**  
2019. Virtual reconstruction of damaged archaeological sites based on Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry and 3D modelling. Study case of a southeastern Iberia production area in the Bronze Age. *Measurement* 136: 225-236.
- Castro, L., R. Yassushi y R. Borges**  
2011. Desenvolvimiento de un VANT totalmente configurado para aplicaciones en agricultura de precisión en Brasil. *Anales XV Simposio Brasileño de Sensores Remotos - SBSR*, Curitiba.
- Chiabrando, F., F. D'Andria, G. Sammartano y A. Spanò**  
2018. UAV photogrammetry for archaeological site survey. 3D models at the Hierapolis in Phrygia (Turkey). *Virtual Archaeology Review* 9 (18): 28-43.
- Cobo, C.**  
2004. La Mitad del Mundo: El sitio arqueológico sobre el Monte Catequilla en la Latitud Cero, Ecuador. Etno y Arqueo-Astronomía en las Américas. *Memorias del Simposio ARQ-13 del 51 Congreso Internacional de Americanistas*, Santiago.  
2012. *Astronomía Quitú-Caranquí Catequilla y los discos líticos, evidencias de la astronomía antigua en los Andes ecuatoriales*. QUIMERADREMS Editores, Quito.  
2017. Catequilla y los Discos Líticos, evidencia de la Astronomía Antigua en los Andes Ecuatoriales. *Revista de Topografía AZIMUT* (8): 41-62.
- Cowley, D., C. Moriarty, G. Geddes, G. Brown, T. Wade y C. Nichol**  
2017. UAVs in Context: Archaeological Airborne Recording in a National Body of Survey and Record. *Drones* 2 (1): 2.
- Criado, F. y D. Barreiro**  
2013. El patrimonio era otra cosa. *Estudios Atacameños: Arqueología y Antropología Surandinas* (45): 5-18.
- Cuerno, C.**  
2015. *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Gráficas Arias Montano S.A., Madrid.
- Daftry, S., C. Hoppe y H. Bischof**  
2015. Building with drones: Accurate 3d facade reconstruction using mavs. *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference*. 3487-3494. Seattle.
- Díaz, J.**  
2015. *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Tesis de maestría, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

- Díaz, M., A. Crespo, M. Farjas, C. Ruíz, G. Martínez, E. Carbajosa, J. Pereira, S. Ludeña y I. Del Castillo  
**2015.** Aplicación de nuevas tecnologías en la Arqueología de la Guerra Civil: Los Yesares, Pinto (Madrid). *Virtual Archaeology Review* 6 (12): 122-136.
- DJI. "PHANTOM 4 SPECS" 2017**  
<https://www.dji.com/phantom-4/info> (16 diciembre 2018).
- Eisenbeiss, H.**  
**2004.** A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Phitsanulok.
- Fernández, J. y G. Gutiérrez**  
**2016.** Aplicaciones geológicas de los drones. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 29 (1): 89-105.  
**2017a.** Modelización 3D con tecnología VANT para la reproducción y preservación del registro arqueológico del Proyecto Geoparques Las Loras (Palencia - Burgos). Investigaciones arqueológicas en el valle del Duero, del Paleolítico a la Edad Media. *Actas de las V Jornadas de Jóvenes Investigadores del valle del Duero*, Valladolid.  
**2017b.** Uso de LiDAR y aeronaves no tripuladas para la cartografía y registro de zonas de interés geominero: un ejemplo de la minería aurífera romana en el Valle del Eria (León, España). Investigaciones arqueológicas en el valle del Duero, del Paleolítico a la Edad Media. *Actas de las V Jornadas de Jóvenes Investigadores del valle del Duero*, Valladolid.
- Fiorillo, F., F. Remondino, S. Barba, A. Santoriello, C. De Vita y A. Casellato**  
**2013.** 3D digitization and mapping of heritage monuments and comparison with historical drawings. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* II-5 (W1): 133-138. Strasbourg.
- Friedman, R., A. Sofaer y R. Weiner**  
**2017.** Remote Sensing of Chaco Roads Revisited: Lidar Documentation of the Great North Road, Pueblo Alto Landscape, and Aztec Airport Mesa Road. *Journal of the Society for American Archaeology* 5 (4): 365-381.
- Gehmlich, B. y M. Block**  
**2015.** Diversity of Flight Strategies in UAV Recording. *International Conference on Cultural Heritage and New Technologies*, Viena.
- Gruen, A., Z. Zhang y H. Eisenbeiss**  
**2012.** UAV photogrammetry in remote areas—3D modeling of Drapham Dzong, Bhutan. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXII ISPRS Congress*, Melbourne.
- Guillén, N.**  
**2013.** Producción audiovisual para promocionar los sitios turísticos: Ruinas de Pucará de Rumicucho, El Cerro Catequilla y la Reserva Ecológica Pululahua de la parroquia San Antonio de Pichincha. Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Haubeck, K. y T. Prinz**  
**2013.** A UAV-Based Low-Cost Stereo Camera System for Archaeological Surveys - Experiences from Doliche (Turkey). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL-1 (W2): 195-200.
- Herrmann, J., B. Glissmann, P. Sconzo y P. Pfälzner**  
**2018.** Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Survey with Commercial-Grade Instruments: A Case Study from the Eastern Habur Archaeological Survey, Iraq. *Journal of Field Archaeology* 43 (4): 269-283.
- Hill, A.**  
**2019.** Economical drone mapping for archaeology: Comparisons of efficiency and accuracy. *Journal of Archaeological Science: Reports* 24: 80-91.
- IGM**  
**2017.** Protocolo de Fiscalización para proyectos de generación de cartografía base con fines catastrales escala

1:1000, obtenida a través de método aerofotogramétrico, digitalización 2D sobre ortofoto o levantamiento topográfico. Instituto Geográfico Militar, Quito.

**James, M. y S. Robson**

2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms* 39 (10): 1413-1420.

**Kabata, S., J. López, A. Muñoz y H. Fukuhara**

2016. Mapeo y registro de artefactos en 3D utilizando Agisoft PhotoScan y Drone en el Proyecto Arqueológico Tlalancaleca, Puebla. *Boletín del Instituto de Estudios Latinoamericanos de la Universidad de Estudios Extranjeros de Kyoto* 16: 121-140.

**Kraus, K.**

2007. *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. Walter de Gruyter, Göttingen.

**Lambers, K. y F. Remondino**

2007. Optical 3D measurement techniques in archaeology: recent developments and applications. *Proceedings of the 35th International conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*, Berlín.

**Lasaponara, R., N. Masini, A. Pecci, F. Perciante, D. Pozzi, E. Rizzo, M. Scavone y M. Sileo**

2016. Qualitative evaluation of COSMO SkyMed in the detection of earthen archaeological remains: The case of Pachamacac (Peru). *Journal of Cultural Heritage* 23: 55-62.

**Lerma, J.**

1999. *Aerotriangulación: cálculo y compensación de un bloque fotogramétrico*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.

2002. *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

**Lorenzon, M., S. Chapman, R. Littman y J. Silverstein**

2013. 3D modeling and mud brick conservation at

Tell Timai, Egypt. *International Conference on Cultural Heritage and New Technologies*, Viena.

**Ma, L., M. Li, Y. Wang, L. Tong y L. Cheng**

2013. Using High-Resolution Imagery Acquired with an Autonomous Unmanned Aerial Vehicle for Urban Construction and Planning. *Proceedings of the 2013 the International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013)*, Nanjing.

**Maldonado, L.**

2011. *Video documental para contribuir a la revitalización de la identidad andina a través de la revalorización del Monumento de Catequilla*. Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito.

**Mandujano, S., M. Mulero y A. Rísquez**

2017. Drones: una nueva técnica para el estudio y monitoreo de fauna y hábitats. *Agroproductividad* 10 (10): 79-84.

**Montero, O., J. Sardi y M. Hermida**

2017. Posibilidades de la reconstrucción tridimensional de zonas patrimoniales en base a fotogrametría y escáner LIDAR. El Barranco de la ciudad de Cuenca como caso de estudio. *MASKANA* 8 (2): 83-98.

**Musakwa, W. y A. Van Niekerk**

2015. Earth Observation for Sustainable Urban Planning in Developing Countries: Needs, Trends, and Future Directions. *Journal of Planning Literature* 30 (2): 149-160.

**Next, F. y F. Remondino**

2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics* 6 (1): 1-15.

**NSDI**

1998. *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. Federal Geographic Data Committee, Virginia.

**Ortiz, P.**

2013. Digitalización automática del patrimonio

- arqueológico a partir de fotogrametría. *Virtual Archaeology Review* 4 (8): 46-49.
- Pacheco, D.**  
2017. Drones en espacios urbanos: Caso de estudio en parques, jardines y patrimonio edificado de Cuenca. *ESTOA* 6 (11): 159-168.
- Pajas, J. y A. Oliván**  
2012. Métodos, técnicas y estándares para la documentación geométrica del patrimonio cultural. *Virtual Archaeology Review Métodos* 3 (5): 38-42.
- Pavelka, K., J. Šedina y E. Matoušková**  
2018. High Resolution Drone Surveying of the Pista Geoglyph in Palpa, Peru. *Geosciences* 8 (12): 479.
- Peña, J., J. Torres, A. Serrano y F. López**  
2014. Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Revista de Teledetección* 42: 39-47.
- Pérez, J., G. Gonçalves y E. Cerrillo**  
2019. A protocol for mapping archaeological sites through aerial 4k videos. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 13: 1-10.
- Pierrot, M., L. De Luca y F. Remondino**  
2011. Procedimientos automatizados basados en imagen de artefactos precisos. Modelado en 3D y Ortoimagen. *XXIIIth Internacional CIPA Simposio*, Praga.
- Querol, M.**  
2010. *Manual de gestión del patrimonio cultural*. 1era ed. Ediciones Akal S. A., Madrid.
- Quinto, S.**  
2016. Uso y aprovechamiento de las nuevas tecnologías en la conservación del patrimonio edificado. Reseña de casos emblemáticos en Perú. *Denevir* 3 (5): 113-132.
- Ramírez, E., A. Cruz, O. Reyes, A. Lagunas y C. Lopez**  
2015. Uso de vehículo aéreo no tripulado para la zonificación del área destinada voluntariamente para la conservación "La Ciénega" Puerto Ángel, Oaxaca. *Memorias de resúmenes en extensos SELPER-XXI-México-UACJ-2015*, Ciudad Juárez.
- Remondino, F., L. Barazzetti, F. Next, M. Scaioni y D. Sarazzi**  
2011. UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38 (1): C22.
- Resco, P., F. Espinoza, M. Aguirre y C. Matovelle**  
2018. Fotogrametría digital para el levantamiento 3D del sitio arqueológico de Todos Santos, Cuenca (Ecuador). *ESTOA* 7 (13): 25-35.
- Rivera, D.**  
2018. *Observatorio Astronómico en Catequilla: "Un Recorrido de Luz hacia las Estrellas"*. Tesis de grado, Universidad San Francisco de Quito, Quito.
- Rodríguez, P.**  
2017. Reflexiones sobre el levantamiento arqueológico actual. *DISEGNARECON* 10 (19): 1-5.
- Salvo, G., L. Caruso y A. Scordo**  
2014. Urban Traffic Analysis through an UAV. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 111 (5): 1083-1091.
- Sani, J., A. Tierra y A. Robayo**  
2015. Vehículos aéreos no tripulados - UAV para la elaboración de cartografías escalas grandes referidas al marco de referencia SIRGAS - Ecuador. *X Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2015*, Sangolquí.
- Seeber, G.**  
2003. *Satellite Geodesy*. 2da ed. Walter de Gruyter, New York.

**Soto, E.**

2016. Elaboración de una restitución catastral utilizando vehículos aéreos no tripulados. *Revista de Geografía (RECIFE)* (3): 155-169.

**Stal, C., B. Lonneville, T. Nuttens, P. De Maeyer y A. De Wulf**

2014. Highly Detailed 3D Modelling of Mayan Cultural Heritage Using an UAV. *FIG Congress 2014*, Kuala Lumpur.

**Tapete, D.**

2019. Earth Observation, Remote Sensing, and Geoscientific Ground Investigations for Archaeological and Heritage Research. *Geosciences* 9 (4): 161.

**Topcon. "HIPER V Versatile function GNSS Receiver"**

2017. [https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product\\_files/hiper\\_v\\_broch\\_7010\\_2121\\_reve\\_sm.pdf](https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/hiper_v_broch_7010_2121_reve_sm.pdf) (16 diciembre 2018),

**Torres, J., J. Peña, A. De Castro y F. López**

2014. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture* 103: 104-113.

**Urcia, A., J. Darnell, C. Darnell y S. Zaia**

2018. From Plastic Sheets to Tablet PCs: A Digital Epigraphic Method for Recording Egyptian Rock Art and Inscriptions. *African Archaeological Review* 35 (2): 169-189.

**Verhoeven, G.**

2009. Providing an archaeological bird's-eye view – an overall picture of ground based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in Archaeology. *Archaeological Prospection* 16: 233–249.

**Waagen, J.**

2019. New technology and archaeological practice. Improving the primary archaeological recording process in excavation by means of UAS photogrammetry. *Journal of Archaeological Science* 101: 11-20.

**Yilmaz, H., M. Yakar, S. Gulec y O. Dulgerler**

2007. Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage* 8 (4): 428-433.