

Fotogrametría aérea con UAV como herramienta para la conservación de sitios arqueológicos. Caso de estudio: Complejo La Esperanza

*Iván Fernando Palacios Orejuela**

RESUMEN

LA ARQUEOLOGÍA ECUATORIANA SE HA CENTRADO ESPECIALMENTE EN COMPRENDER EL PASADO DE LAS REGIONES COSTA Y SIERRA, DEJANDO REZAGADA A LA AMAZONÍA, A PESAR DE GUARDAR UN PASADO HISTÓRICO DE IGUAL IMPORTANCIA. LA CULTURA UPANO ES EL PRINCIPAL ASENTAMIENTO HUMANO PRECOLOMBINO QUE HABITÓ EN EL VALLE DEL UPANO, EN LO QUE HOY ES EL CANTÓN MORONA – SURESTE DEL ECUADOR, CUYOS SITIOS ARQUEOLÓGICOS SE ENCUENTRAN EN AMBAS MÁRGENES DEL RÍO UPANO; UNO DE ESTOS, ES EL COMPLEJO DE MONTÍCULOS CONOCIDO COMO LA ESPERANZA. DEBIDO A LA EXPANSIÓN URBANA Y FALTA DE PROTECCIÓN POR PARTE DE LAS INSTITUCIONES RESPONSABLES, LA CONSERVACIÓN DE ESTOS COMPLEJOS SE ENCUENTRAN EN RIESGO. UNA ALTERNATIVA PARA LEVANTAR INFORMACIÓN QUE PERMITA EVIDENCIAR EL ESTADO ACTUAL DEL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO, SON LOS UAV (UNMANNED AERIAL VEHICLE). EL PRESENTE TRABAJO TIENE POR OBJETIVO APLICAR FOTOGRAMETRÍA AÉREA CON UAV PARA DETERMINAR EL ESTADO DE CONSERVACIÓN DEL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO LA ESPERANZA. MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE POSICIONAMIENTO GNSS Y LA TÉCNICA STRUCTURE FROM MOTION SE OBTUVIERON PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS QUE DEMOSTRARON UN DETERIORO DEL SITIO ARQUEOLÓGICO, DONDE SOLO EL 28.6% DEL COMPLEJO ORIGINAL EXISTE ACTUALMENTE. GRACIAS AL AVANCE DE LAS GEOCIENCIAS, LOS UAV PERMITE GENERAR INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA PRECISA Y DE BAJO COSTE QUE SIRVEN DE INSUMOS PARA TRABAJOS ARQUEOLÓGICOS.

PALABRAS CLAVE: CULTURA UPANO - GNSS - STRUCTURE FROM MOTION - GEOCIENCIAS - VALLE DEL UPANO.

AERIAL PHOTOGRAMMETRY WITH UAV AS A TOOL FOR THE CONSERVATION OF ARCHAEOLOGICAL SITES - CASE STUDY: LA ESPERANZA COMPLEX

ABSTRACT

EQUADORIAN ARCHAEOLOGY HAS FOCUSED ESPECIALLY ON UNDERSTANDING THE PAST OF THE COAST AND HIGHLANDS REGIONS, LEAVING THE AMAZON REGION BEHIND, DESPITE HAVING A HISTORICAL PAST OF EQUAL IMPORTANCE. THE UPANO CULTURE IS THE MAIN PRE-COLUMBIAN HUMAN SETTLEMENT THAT INHABITED THE UPANO VALLEY, IN WHAT IS NOW THE MORONA CANTON - SOUTHEAST OF ECUADOR, WHOSE ARCHAEOLOGICAL SITES ARE LOCATED ON BOTH BANKS OF THE UPANO RIVER; ONE OF THESE IS THE MOUND COMPLEX KNOWN AS LA ESPERANZA. DUE TO URBAN SPRAWL AND LACK OF PROTECTION BY THE RESPONSIBLE INSTITUTIONS, THE CONSERVATION OF THESE COMPLEXES IS AT RISK. AN ALTERNATIVE TO COLLECT INFORMATION THAT ALLOWS TO SHOW THE CURRENT STATE OF THE ARCHAEOLOGICAL HERITAGE IS THE USE OF UAVS. THE PRESENT WORK AIMS TO APPLY AERIAL PHOTOGRAMMETRY WITH UAV TO DETERMINE THE STATE OF CONSERVATION OF THE LA ESPERANZA ARCHAEOLOGICAL COMPLEX. USING A COMBINATION OF GNSS POSITIONING AND THE STRUCTURE FROM MOTION TECHNIQUE, PHOTOGRAMMETRIC PRODUCTS WERE OBTAINED THAT SHOWED A DETERIORATION OF THE ARCHAEOLOGICAL SITE, WHERE ONLY 28.6% OF THE ORIGINAL COMPLEX EXISTS TODAY. THANKS TO ADVANCES IN GEOSCIENCES, UAVS CAN GENERATE ACCURATE AND LOW-COST CARTOGRAPHIC INFORMATION THAT CAN BE USED AS INPUT FOR ARCHAEOLOGICAL WORK.

KEYWORDS: UPANO CULTURE - GNSS - STRUCTURE FROM MOTION - GEOSCIENCES - UPANO VALLEY.

* Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", Sangolquí, Ecuador. ORCID 0000-0003-3209-9810. Correo electrónico: ifpalacios@espe.edu.ec.

Introducción

El territorio ecuatoriano ha sido hogar de diversas culturas de gran importancia histórica, cuya comprensión de los procesos culturales y su interrelación a través de las regiones naturales: Costa, Sierra y Oriente, han sido una de las aristas de la arqueología ecuatoriana. Sin embargo, los trabajos e investigaciones científicas han concentrado su interés en el litoral y callejón interandino del Ecuador, rezagando el entendimiento del pasado precolombino de la región amazónica (Salazar, 1998). Los primeros trabajos sistemáticos en el Oriente fueron realizados por Evans y Meggers (1968) en el valle del río Napo; posteriormente Porras (1961, 1974, 1975, 1978, 1979, 1981, 1985, 1987, 1989) llevó a cabo su investigación en diferentes sitios de la Amazonía, y se convirtió en el arqueólogo que más trabajó en el oriente ecuatoriano, quien definió y propuso una serie de fases culturales para lo que denominó como cultura Upano o tradición Upano (Porras, 1987).

Porras identificó el complejo Sangay como el principal asentamiento de la cultura Upano, y estableció una cronología de ocupación en cuatro fases: Pre-Upano (2750-2520 a. C.), Upano I (1100-120 a. C.), Upano II (40 a. C.-170 d. C.) y Upano III (940 d. C.), basado en el estudio tipológico de la cerámica y resultados de 14C efectuados a muestras dispersas de carbón recolectados en los sondeos de campo (Porras, 1987); sin embargo, autores como Stéphen Rostain y Ernesto Salazar han discrepado en las fechas señaladas por Porras. Como parte del programa arqueológico Sangay – Upano auspiciado por el Instituto Francés de Estudios Andinos durante los años 1995 a 1998 (correspondiente a la última investigación de cooperación internacional hasta la fecha en el cantón Morona), se desarrollaron excavaciones en distintos complejos de Huapula, previamente inventariados por Porras, en los que determinó mediante la estratigrafía del terreno y fechas de radiocarbono, una nueva cronología de las fases de la tradición Upano: \approx 700 a. C., 500-200 a.C., 400-600 d.C. y 800-1200 d.C., y que agrupan en dos fases bien distinguidas que son la denominada Cultura Upano con un periodo entre 700 a.C.-400/600 d.C. y la cultura Huapula que comprende una línea de tiempo entre 700 d.C.-1200 d.C. (Rostain, 1999a, 2010; Salazar, 1998, 2008). El distintivo de la cultura Upano es la decoración de la cerámica con “bandas rojas entre incisiones” con paredes interiores cubiertas por una capa negra muy pulida, de aspecto barnizada (Rostain, 1999b), y el modelo de distribución espacial de montículos que corresponde a una plaza central rodeada por montículos (Ibíd., 2010).

A pesar del gran potencial histórico del valle del Upano, existe poco interés en continuar con la investigación arqueológica de esta entidad geográfica (Palacios, 2020). Una de las falencias identificadas en la literatura científica sobre la cultura Upano, es la limitada producción cartográfica, lo cual se podría inferir que responde a dos motivos: la falta de técnicas y herramientas tecnológicas que actualmente se dispone, y a una decisión propia de los autores en limitar la ubicación de los sitios arqueológicos (esto último menos probable). Esta condicionante, sumado a las presiones antrópicas del sector, han conllevado a un incremento del riesgo en la conservación de los restos arqueológicos de los diversos sitios registrados en el cantón Morona.

Una de las alternativas para coadyuvar con esta problemática, es el uso de drones o UAV que permite a través de técnicas de fotogrametría aérea, generar productos fotogramétricos como ortografías, modelos digitales del terreno, nubes de puntos, entre otros, para obtener información de la superficie del terreno (Palacios y Leiva, 2019); en arqueología, existe un amplio bagaje de estudios en los que demuestran la utilidad de drones para determinar métricas, características morfológicas, modelos 3D (Agudo et al., 2018; Arcusa et al., 2015; Resco et al., 2018), así como el estado de conservación de yacimientos arqueológicos (Acosta et al., 2017; Palacios y Leiva, 2020), de una forma precisa y de bajo coste.

El objetivo del presente trabajo fue aplicar técnicas de fotogrametría aérea con UAV para determinar el estado de conservación del complejo arqueológico La Esperanza del cantón Morona – sureste de la Amazonía ecuatoriana, mediante la obtención de productos fotogramétricos precisos que evidencien el estado actual del sitio arqueológico y la aplicabilidad de los drones en los trabajos arqueológicos en las condiciones naturales de la región oriental.

Metodología

Contexto del área de estudio

El valle del Upano constituye una entidad geográfica de la alta Amazonía, se trata de una plataforma que se ubica en medio de dos cordilleras que son los Andes (al oeste) y el Kutukú (al este) (Palacios y Rodríguez, 2021; Palacios y Toulkeridis, 2020). Este biotopo que comprende ambas márgenes del río Upano, aproximadamente desde el sur en el cantón Sucúa hasta el norte del cantón Morona, es conocido como alto Upano. Está compuesto por las estribaciones de las montañas andinas y tierras bajas amazónicas donde el volcán Sangay se eleva por encima del valle desde el norte (Pazmiño, 2009). Gracias a su ubicación intermedia entre montaña y selva, los poblamientos precolombinos del valle del Upano presentan una mixtura de rasgos amazónicos y andinos (Rostain, 2010), lo cual se mantuvo incluso después del mestizaje y que se puede encontrar en lo que se conoce con el pueblo Macabeo (Barruecos, 1959).

La distribución espacial de los sitios arqueológicos se encuentra documentada en los trabajos de Porras (1987, 1989), los cuales se localizan a lo largo del río Upano, con una aglomeración mayor en la margen oriental de este cuerpo hídrico. En la figura 1 se muestra un croquis de la distribución espacial de los sitios más representativos del alto Upano en el cantón Morona.

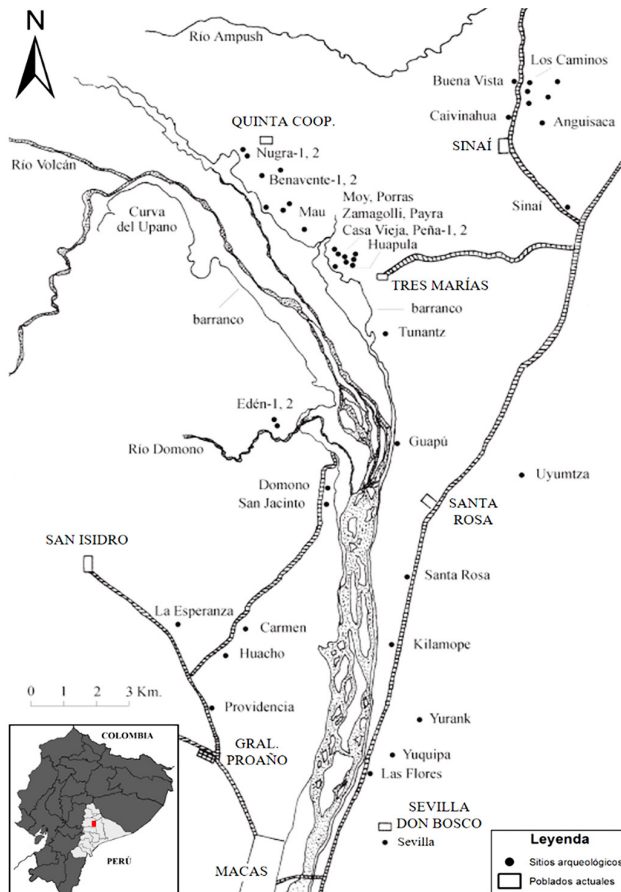


FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE SITIOS CON MONTÍCULOS PRECOLOMBINOS EN EL ALTO UPANO. FUENTE: ADAPTADO DE SALAZAR (2008).

El sitio con montículos precolombino objeto de esta investigación es el denominado por Porras (1987) como La Esperanza, el cual se encuentra ubicado en la parroquia de San Isidro perteneciente al cantón Morona, a 8 Km. hacia el norte de la ciudad de Macas, en el sector conocido actualmente como Huacho. Geográficamente, se ubica en las coordenadas geodésicas $2^{\circ}14'4.74''$ de latitud sur y $78^{\circ}8'24.20''$ de longitud oeste; presenta una temperatura promedio de 25°C y una topografía relativamente plana, rodeado de vegetación forestal propia de la región amazónica (bosque siempreverde), y pastizales para las actividades pecuarias (Palacios y Arellano, 2021; Palacios et al., 2019).

A pesar de ser un sitio inventariado desde los trabajos de Porras, no se tiene registro de levantamientos o excavaciones arqueológicas previas, lo cual otorga un valor agregado al presente estudio al ser el primer trabajo con el uso de tecnologías geoespaciales aplicadas a la conservación este complejo de montículos. En la figura 2 se observa la ubicación del sitio arqueológico de La Esperanza.

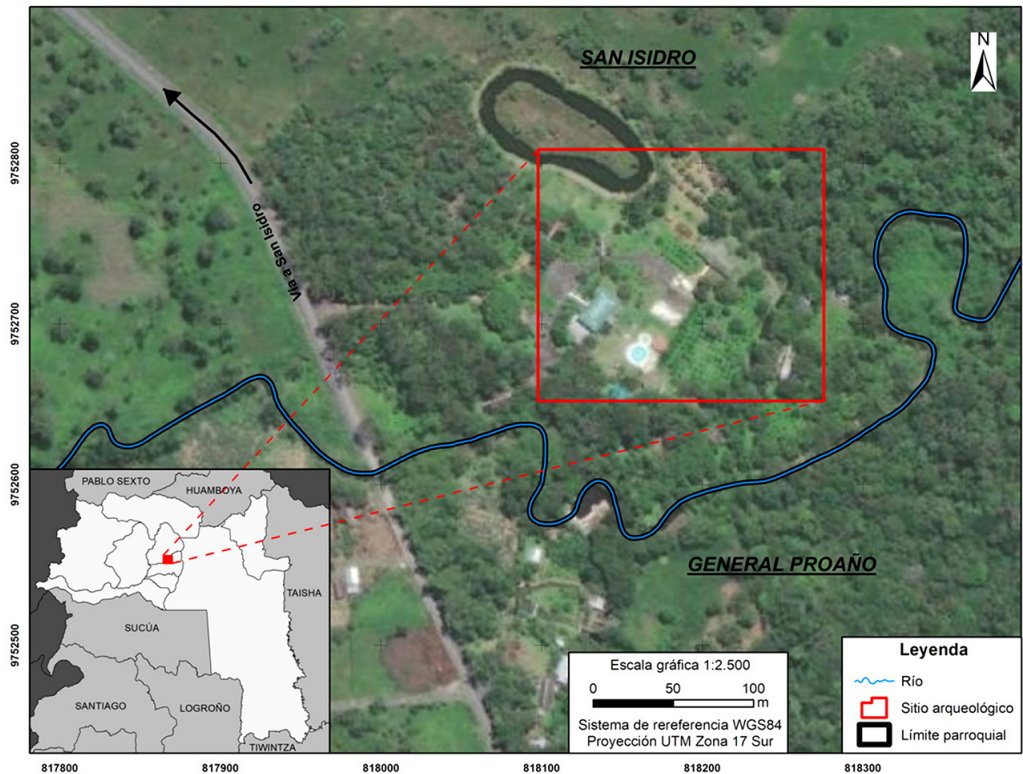


FIGURA 2. MAPA DE UBICACIÓN DEL SITIO ARQUEOLÓGICO LA ESPERANZA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Materiales y métodos

Para la obtención de los productos fotogramétricos que sirvieron para establecer el estado actual del sitio arqueológico, se realizó en dos grandes etapas: levantamiento en campo y post procesamiento de la información capturada con el dron. El trabajo en campo consistió a su vez de dos fases que empezó con el posicionamiento de puntos de control terrestre (GCP) y el posterior vuelo fotogramétrico.

Los GCP fueron distribuidos en el área de estudio de forma que abarque la totalidad del vuelo con el dron. Un total de 6 puntos fueron colocados sobre marcas de tierra (también llamados paineles o land mark) para facilitar su fotoidentificación desde el dron y sirvieron para el ajuste del bloque fotogramétrico. El método de posicionamiento geodésico para la obtención de los GCP fue estático diferencial, a través de una antena GPS doble frecuencia Ashtech Geodetic IV; el post procesamiento de los datos se realizó con el software Trimble Business Center (TBC) versión 5.20, en el que se ingresaron los datos de la estación de monitoreo continuo MAEC ubicada en el edificio del GAD Provincial de Morona Santiago (ciudad de Macas), la misma que forma parte de Red Geodésica Nacional del IGM (REGME), además de pertenecer a la red SIRGAS (Palacios & Arellano, 2022). El sistema de referencia con el que se trabajó fue WGS84, datum SIRGAS – ITRF2008, época 2016.44.

El vuelo fotogramétrico partió de un plan de vuelo de grilla simple, con el cual se determinaron las características del vuelo, como la altura de vuelo (100 m.), el traslape (80% longitudinal y transversal), ángulo de toma ortogonal (90°), tamaño de pixel (2.73 cm.), tiempo estimado del vuelo (18 min). Un UAV Phantom 4 Pro fue usado para la captura de las imágenes, el cual levantó un área aproximada de 24 ha., mediante la aplicación de la técnica Structure from Motion (SfM), que se basa en principios de fotogrametría digital para la generación de modelos tridimensionales con imágenes tomadas desde distintas posiciones de forma secuencial (Wang et al., 2019).

La fase de post procesamiento de la información levantada con el UAV tiene por objetivo el ajuste del bloque fotogramétrico, el cual es posible a través de la ecuación de colinealidad (Kraus, 2007). En este estudio se utilizó el software Pix4D Mapper para la obtención de los productos fotogramétricos, en que se escogió los parámetros de optimización de la cámara y densificación de la nube de puntos en la más alta resolución. Dentro del software, el primer paso fue la orientación relativa de las imágenes y obtención de la nube dispersa de puntos, que resultó de la alineación e identificación de puntos comunes entre las imágenes. Una malla fue creada sobre la cual se produce la nube densa de puntos; a continuación, los GCP fueron “pinchados” en todas las imágenes que los contenían para finalmente optimizar el alineamiento de la cámara, es decir, al cálculo de los parámetros de alineación de los ángulos de giro en sus tres ejes (Urban et al., 2020), y generar los productos fotogramétricos con los que fue posible la reconstrucción tridimensional del complejo La Esperanza.

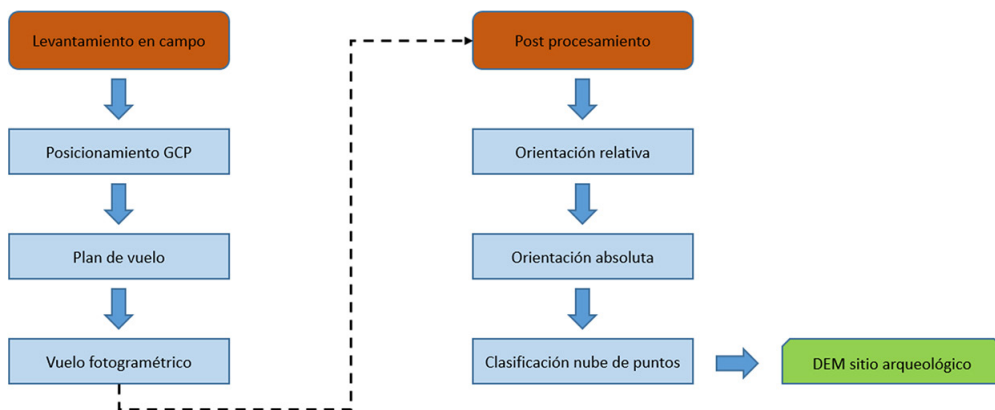


FIGURA 3. FLUJOGRAMA METODOLÓGICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

A la nube densa de puntos resultante fue necesario clasificarla para diferenciar los puntos que representan la superficie topográfica, de los objetos existentes sobre este nivel de referencia (vegetación y construcciones antrópicas). Para ello, se usó el software Global Mapper con el que se hizo una clasificación supervisada, de tal forma que el modelo 3D final (modelo digital del terreno) represente claramente los montículos existentes; de esta forma se generó la información cartográfica para el análisis del estado de conservación actual del sitio arqueológico. En la figura 3, se resumía el flujograma de la metodología aplicada en este estudio.

Resultados

El control terrestre es fundamental para garantizar la correcta georreferenciación de los productos fotogramétricos, de esta forma se obtiene información cartográfica de alta precisión que permite conocer la ubicación exacta de los objetos en el espacio tridimensional, y la escala de trabajo a la cual se representa los datos. La técnica de posicionamiento estático diferencial con la que se colocaron los seis GCP, permitió obtener una precisión relativa de $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ en la componente horizontal y $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ en la componente vertical (Seeber, 2003). Dentro de un entorno SIG (sistema de información geográfica) se generó el modelo digital del terreno a partir de la nube densa de puntos clasificada, cuyo resultado permitió identificar claramente los montículos que forman parte del complejo La Esperanza. En la figura 4 se presenta el modelo resultante donde distingue en tonalidades rojas la distribución espacial de los montículos existentes del sitio.

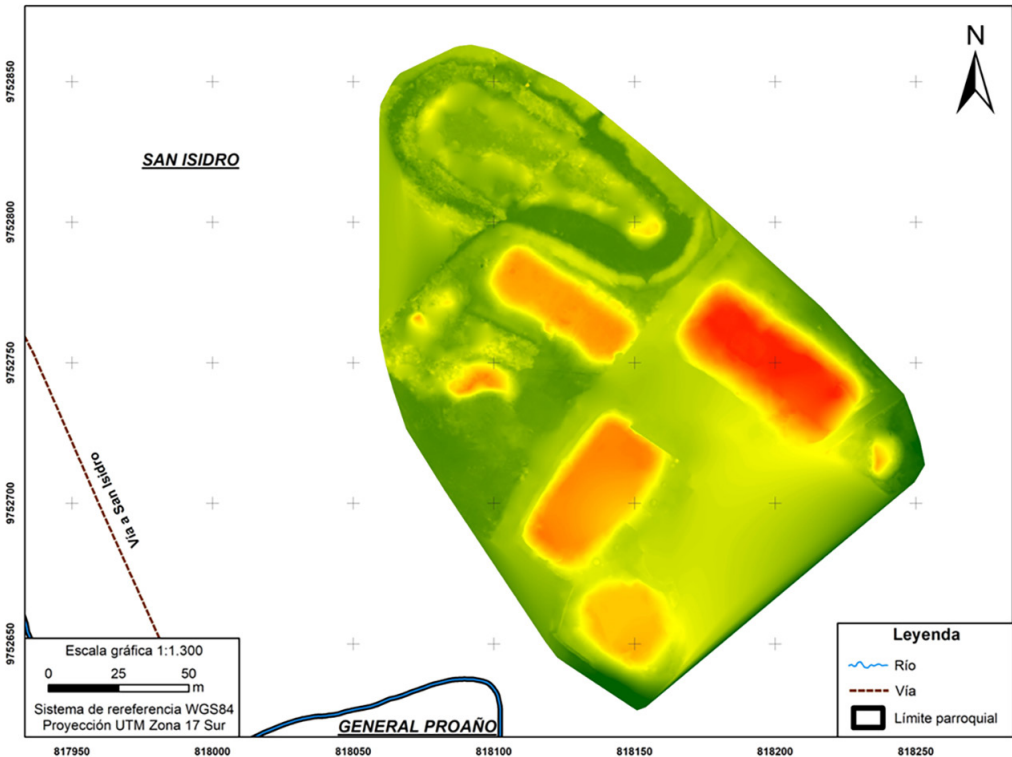


FIGURA 4. MODELO DIGITAL DEL TERRENO CON LOS MONTÍCULOS DEL SITIO LA ESPERANZA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la figura anterior se observa claramente cuatro montículos, los cuales presentan alturas entre 2.5 – 4.0 m. aproximadamente, con una forma alargada (tres) y redonda (uno) ubicados de manera que dejan espacios entre ellos (plazas). Hacia el sur del montículo más alto se evidencia un corte de éste debido a un sendero construido, además, al norte del complejo se encuentra una piscina artificial lo que denota un movimiento de tierra “reciente”; pero el más notorio hallazgo de la acción humana actual es la destrucción (casi total) de un montículo ubicado al oeste del sitio arqueológico. En la figura 5, se ejemplifica de mejor forma el estado actual de los montículos precolombinos en la zona de estudio.

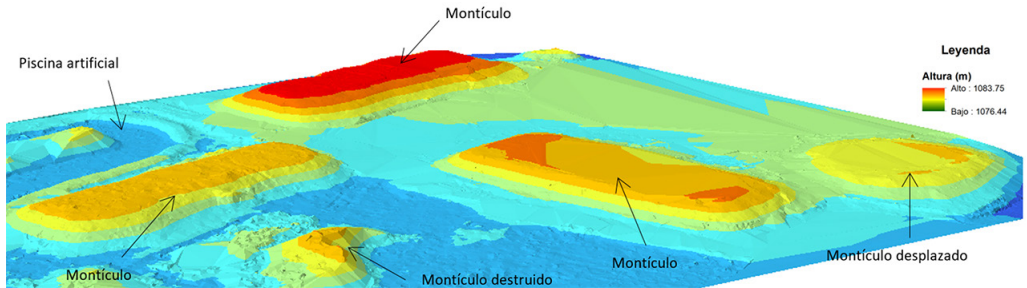


FIGURA 5. VISTA 3D DE LOS MONTÍCULOS DEL SITIO LA ESPERANZA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Discusión

A la fecha de la presente investigación, es evidente el deterioro en que se encuentra este sitio arqueológico. Este complejo de montículos se emplaza en predios particulares que en un inicio formaron parte de un complejo turístico conocido como Las Tolitas y, en la actualidad pertenecen a una escuela privada, lo cual dificulta en gran medida la intervención o gestión de la conservación del patrimonio. A más de los movimientos de tierras, sobre tres de los cuatro montículos existen construcciones de hormigón que lastimosamente han sido levantadas sin algún tipo de precaución, causando un conflicto en el uso del suelo, que en principio debería ser de protección patrimonial. Según los trabajos de Porras, este complejo de montículos era mucho más grande de lo que hoy en día se mantiene, y al comparar con el estado actual, es visible el daño y alteración que ha sufrido este sitio, como se demuestra en la figura 6.

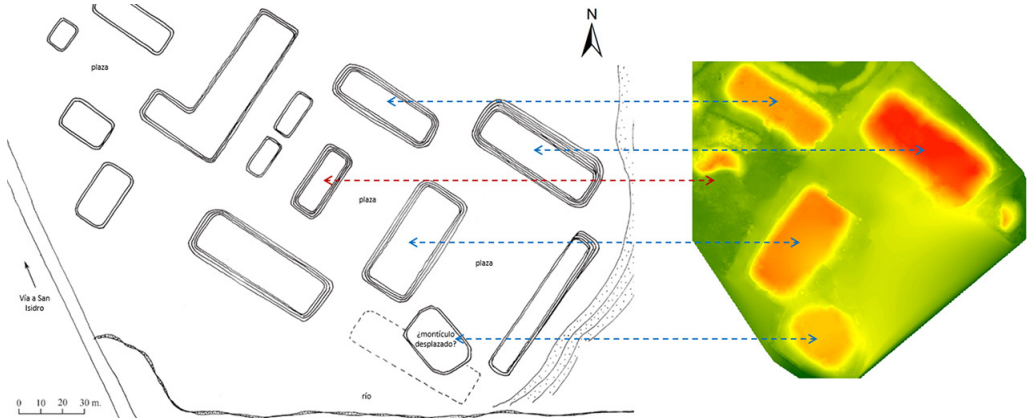


FIGURA 6. COMPARACIÓN ENTRE EL COMPLEJO DE MONTÍCULOS ORIGINAL (IZQ.) Y SU ESTADO ACTUAL (DER.) EN EL SITIO LA ESPERANZA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Del total de montículos que conformaban el sitio arqueológico originalmente, hoy en día se mantienen solo el 28.6%, es decir que el estado de conservación es prácticamente nulo y, si no se toman las medidas correctivas, es posible que el resto de montículos desaparezcan por completo. En la figura 7, se muestran las construcciones presentes sobre los montículos de La Esperanza, así como la destrucción casi total del montículo central del sitio original.



FIGURA 7. CONSTRUCCIONES SOBRE LOS MONTÍCULOS Y LA DESTRUCCIÓN DEL MONTÍCULO CENTRAL EN EL SITIO LA ESPERANZA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La realidad que se encuentra en el complejo de La Esperanza, lastimosamente no es un caso aislado, ya que existe evidencia a lo largo del territorio cantonal de la destrucción total o parcial de montículos, así como de vestigios arqueológicos a causa de las actividades antrópicas, principalmente por la apertura de vías y construcción de viviendas e infraestructura, lo que denota dos importantes puntos críticos para la conservación de los sitios arqueológicos, que son: el poco interés de los tomadores de decisiones (en este caso a nivel cantonal), y la falta de planificación para la ocupación y uso del suelo. Esta última arista, parte de lo estipulado en el artículo 55 literal h del Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) que hace alusión a la preservación del patrimonio arquitectónico, cultural y natural, como una de las competencias exclusivas de los gobiernos municipales en el Ecuador (Asamblea Nacional, 2010), y que por la que perciben un presupuesto que debería ser ocupado para la protección y gestión del patrimonio cultural. Esta base legal permite articular mediante los distintos instrumentos de planificación territorial como son los planes de desarrollo y ordenamiento territorial (PDOT), planes de uso y gestión del suelo (PUGS) y sistemas de información local (SIL), la definición de políticas, objetivos y proyectos (Palacios y Carpio, 2021), que coadyuvan a la protección del patrimonio arqueológico presente en el territorio. Los PUGS son precisamente donde se deberían delimitar los polígonos de intervención territorial (PIT) de protección patrimonial, que para el caso del cantón Morona podrían ser los complejos inventariados por los trabajos de Porras; sin embargo, dicha planificación es débil en este sentido, y por ende, no se cuenta con una normativa clara que evite y proteja este tipo de bienes arqueológicos.

Sumado a la falta de planificación territorial, el ente rector a nivel nacional que es el Instituto Nacional de Patrimonio y Cultura (INPC) ha evidenciado, en el caso del cantón Morona, un exiguo seguimiento del estado de los bienes patrimoniales, ya sea por desconocimiento, falta

de recursos o interés; al respecto, es lamentable que en comparación a las otras regiones del país, no exista la misma voluntad política para realizar una adecuada gestión del patrimonio arqueológico. Por ello, se puede inferir que mientras no exista un compromiso desde la parte institucional (nacional – local) y no se regule y planifique la expansión urbana, la conservación de los sitios arqueológicos del cantón Morona podrían sufrir la misma consecuencia que del complejo La Esperanza.

Estudios relacionados a la temática de conservación patrimonial, señalan que los UAV son actualmente una alternativa técnicamente viable para la obtención de información precisa y de bajo coste, que permiten llevar un inventario periódico, identificación de posibles amenazas o riesgos, facilitan actividades de prospección arqueológica y generación de cartografía temática (Fiz et al., 2022; Kelagiannis et al., 2021; Ulvi, 2022). Como se mencionó anteriormente, en el caso particular del complejo analizado, no existe un registro detallado del sitio original, a más de los croquis elaborados por Porras (Salazar, 2008); no obstante, esta información permite contraponer con los productos resultantes del levantamiento del UAV, destacando a más de la ubicación y distribución espacial de los montículos, la singular forma y emplazamiento del montículo hacia el sur del complejo, el cual aparentemente fue construido intencionalmente de esa manera. Nuevas investigaciones han demostrado la utilidad y precisión de la información arqueológica que se puede obtener mediante drones, como el trabajo de Palacios (2023), quien determinó las características morfométricas de montículos en varios sitios arqueológicos de Morona, incluyendo al complejo La Esperanza, cuyos datos al ser comparados con los registros realizados por Rostain (1997, 1999a) en el Complejo XI de Huapula, tienen concordancia en sus dimensiones y forma, lo que denota la potencialidad de los productos fotogramétricos generados con vehículos aéreos no tripulados de bajo coste.

Es preciso señalar que con el avance de las tecnologías geoespaciales y con los algoritmos de procesamiento digital, se puede obtener información de formas distintas a las técnicas de sensoramiento remoto tradicionales donde se centran en el análisis de imágenes multispectrales, las cuales en regiones como las del presente estudio poseen limitaciones debido a condiciones climáticas (Cepeda et al., 2018), o la densa cobertura boscosa (Palacios et al., 2021). En arqueología, durante la última década se han incrementado los estudios que utilizan sensores activos, como el conocido Lidar (del inglés, Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), que permite superar las dificultades presentes en los sensores pasivos. Trabajos como los de Prümers et al., (2022) en la Amazonía boliviana, VanValkenburgh et al., (2020) en la Amazonía peruana, los de Romero y Bray (2014), en los Andes septentrionales del Ecuador, Castro et al., (2021) en el bosque litoral ecuatoriano, son ejemplos del potencial de esta técnica para el levantamiento arqueológico en zonas de difícil acceso.

En el caso concreto del valle del Upano, la reciente investigación publicada por Sánchez y Álvarez (2023), en el marco de un programa desarrollado por el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural en el año 2015, donde se sobrevoló con tecnología Lidar una superficie aproximada de 300 km², se logró identificar macroasentamientos compuestos por montículos, caminos, zanjas, entre otras estructuras que abarcan los complejos registrados por Porras y muchos otros desconocidos, lo que coloca a esta entidad geográfica en el debate amazónico sobre monumentalidad y densidad de asentamientos humanos prehispánicos. Sin embargo, a pesar de las ventajas en el uso del Lidar, una gran limitante para su uso es el coste económico y computacional requerido para la obtención de resultados a un nivel de detalle suficiente de análisis; por ello, la combinación de técnicas como SfM a partir de drones de bajo costo es una alternativa metodológica válida, con preeminencia en superficies de estudio tan extensas y cuyo dosel arbóreo no sea denso. Además, los resultados obtenidos con UAV pueden ser realizados mediante la correlación con información secundaria disponible, como son los modelos digitales mundiales ALOS PALSAR (Coll et al., 2023; Stewart et al., 2013), que gracias a sus características de procesamiento mediante interferometría radar, representa con mayor precisión el suelo bajo una cobertura boscosa (Palacios y Toulkeridis, 2022); y también a

través de índices de vegetación generados a partir de imágenes aéreas del dron, que coadyuvan a fotoidentificar estructuras arqueológicas en la superficie terrestre (Materazzi y Pacifici, 2022; Uribe et al., 2018).

En este sentido, la presente investigación ha demostrado que mediante productos fotogramétricos obtenidos con dron de bajo costo, resultantes de la aplicación de técnicas de fotogrametría aérea y posicionamiento satelital GNSS, fue posible determinar el estado de conservación del sitio arqueológico La Esperanza, el mismo que forma parte del pasado histórico del cantón Morona y que lastimosamente no se encuentra en un buen estado de conservación. Asimismo, brinda un punto de partida para futuras investigaciones que permitan generar nuevos conocimientos a través de la combinación de las tecnologías geoespaciales, y comprender la transformación de los paisajes tropicales prehispánicos.

Conclusiones

Mediante la utilización de UAV se generó información cartográfica, con la que se determinó que el estado actual de conservación del complejo arqueológico La Esperanza es malo, con solo el 28.6% de los montículos que conformaban el sitio original.

Gracias al avance de las tecnologías geoespaciales, la fotogrametría aérea con plataformas no tripuladas se plantea como una alternativa precisa y de bajo coste para trabajos relacionados al patrimonio arqueológico, en comparación a las técnicas tradicionales y de costos elevados, cuyos productos permiten además, preservar el sitio arqueológico en formato digital para su interpretación, estudio y registro.

El flujo de trabajo seguido en la presente investigación se plantea como un modelo replicable para el resto de sitios arqueológicos de la región amazónica y en especial del cantón Morona, con el fin de obtener productos georreferenciados de precisión y que sirvan para la gestión adecuada del patrimonio arqueológico.

Bibliografía

- Acosta, G. et al., V. 2017. “El empleo de fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT/dron) como herramienta de evaluación del patrimonio en riesgo: chinampas arqueológicas de Xochimilco”, en: *Revista Española de Antropología Americana*, 47, pp.: 185-197.
- Agudo, P. et al. 2018, “The Potential of Drones and Sensors to Enhance Detection of Archaeological Cropmarks: A Comparative Study Between Multi-Spectral and Thermal Imagery”, en: *Drones*, 2(3), 29.
- Arcusa, H. et al. 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, Zaragoza, pp.: 533-539.
- Asamblea Nacional. 2010, *Registro Oficial Suplemento 303. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización*, Ecuador.
- Barruecos, D. 1959, *Historia de Macas*, Editorial Don Bosco, Cuenca.
- Castro, M. et al. 2021, “Espacios agrarios, asentamientos prehispánicos y tecnología LIDAR en el área costera central del Ecuador”, en: *Virtual Archaeology Review*, 14(25), pp.: 140-157. doi:10.4995/var.2021.14891
- Cepeda, M. et al. 2018, “Multiresolution analysis in the visible spectrum of Landsat-TM images through Wavelet Transform”, en: *Geographia Technica*, 13(1), pp.: 20-29. doi:10.21163/GT_2018.131.03
- Coll, V. et al. 2023, “Fluvial terrace mapping from ALOS-PALSAR data for archaeological prospection in the middle Uruguay River basin, Argentina”, en: *Journal of Archaeological Science: Reports*, 48, 103888. doi:10.1016/j.jasrep.2023.103888
- Evans, C. y Meggers, B. 1968, *Archeological investigations on the Rio Napo, Eastern Ecuador*, Smithsonian Contributions to Anthropology, Washington.
- Fiz, J. et al. 2022, “Examples and Results of Aerial Photogrammetry in Archeology with UAV: Geometric Docu-

- mentation, High Resolution Multispectral Analysis, Models and 3D Printing”, *Drones*, 6(3), 59. doi:10.3390/drones6030059
- Kelagiannis, M. *et al.* 2021, “Chapter 18 - GNSS and UAV in archeology: high-resolution mapping in Cephalonia Island, Greece. GPS and GNSS Technology”, en: *Geosciences*, pp.: 371-390. doi:10.1016/B978-0-12-818617-6.00008-1
- Kraus, K. 2007, *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*, Walter de Gruyter, Gottingen.
- Materazzi, F. y Pacifici, M. 2022, “Archaeological crop marks detection through drone multispectral remote sensing and vegetation indices: A new approach tested on the Italian pre-Roman city of Veii”, en: *Journal of Archaeological Science: Reports*, 41, 103235. doi:10.1016/j.jasrep.2021.103235
- Palacios, I. 2023, “Uso de drones para la caracterización morfométrica de sitios arqueológicos en Morona - Amazonía ecuatoriana”, en: *Revista Geoespacial*, 20(1), pp.: 1-17. doi:10.24133/geoespacial.v20i1.3170
- 2020, *Generación de un modelo de crecimiento tendencial urbano de la ciudad de Macas (Ecuador) al año 2030, mediante técnicas de modelación espacial multivariable*, tesis de maestría, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- Palacios, I., y Arellano, K. 2022, “Obtención de alturas niveladas mediante nivelación GPS Caso de estudio: Morona-Ecuador”, en: *Uniciencia*, 36(1), pp.: 1-13. doi:10.15359/ru.36-1.26
- 2021, “Modelo predictivo del cambio de cobertura forestal en el Área de Conservación Municipal Quilamo – Cantón Morona”, en: *Revista Geoespacial*, 18(1), pp.: 1-13. doi:10.24133/geoespacial.v18i1.2201
- Palacios, I. y Carpio, E. 2021, “Sistema de Información Local, una herramienta para la planificación territorial de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales del Ecuador”, en: *Revista Geoespacial*, 18(2), pp.: 1-17.
- Palacios, I., y Leiva, C. 2020, “Establecimiento del estado de conservación en yacimientos arqueológicos mediante UAVS estudio de caso: Cerro Catequilla”, en: *La Zaranda de Ideas*, 17(2), pp.: 6-20.
- 2019, “Evidencia de la relación entre Arqueoastronomía y Geodesia satelital en el Cerro Catequilla, Ecuador”, en: *Revista de Arqueología Americana*, (36), pp.: 177-193. doi:10.35424/rearam.36.2018.389
- Palacios, I., y Rodríguez, F. 2021, “Economic valuation of environmental goods and services of the Protector Forest Kutukú – Shaimi, SE Ecuador”, en: *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 27 (2), pp.: 117-132.
- Palacios, I., y Toulkeridis, T. 2020, *Evaluation of the susceptibility to landslides through diffuse logic and analytical hierarchy process (AHP) between Macas and Riobamba in Central Ecuador*, 2020 Seventh International Conference on Democracy and Government (ICEDEG), pp.: 201-207, doi:10.1109/ICE-DEG48599.2020.9096879
- Palacios, I., y Toulkeridis, T. 2022, “Analysis of the precision of different: digital models of global and local elevations in continental Ecuador”, en: *Revista Geográfica Venezolana*, 63(2), pp.: 110-127.
- Palacios, I. *et al.* 2019, “Almacenamiento de carbono como servicio ambiental en tres reservas naturales del Ecuador”, en: *Revista Geoespacial*, 16(1), pp.: 1-14. doi:10.24133/geoespacial.v16i1.1275
- Palacios, I. *et al.* 2021, “Pixel Purity Index Applied to the Mapping of Degraded Soils by the Presence of Cangahuas in the Ilaló Volcano, Ecuador” en: *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11 (5), pp.: 2121-2127. doi:10.18517/ijaseit.11.5.14684
- Pazmiño, E. 2009, “Desarrollo cultural prehispánico en el valle del Alto Upano: Análisis cerámico del sitio “La Lomita”, Morona Santiago”, en: *Antropología: Cuadernos de Investigación*, (8), Quito, pp.: 149-165.
- Porrás, P. 1989, Investigations at the Sangay mound complex, Eastern Ecuador. National Geographic Research, 5(3), 374-381.
- 1985, “Arte rupestre del Alto Napo, valle del Misaguallí, Ecuador”, Artes Gráficas Señal, Quito.
- 1981, “Sitio Sangay A. Informe preliminar de la primera etapa”, en: *Revista de la Universidad Católica*, 9(29), pp.: 105-145.
- 1979, “Scoperta recente di una “città perduta” sulle pendici del Sangay (sudest dell’ Ecuador)”, en: *Incontro tra due civiltà. Passato storico e prospettive future.*, Università degli studi di Cassino, Italia, pp.: 18-32.
- 1978, *Arqueología de la Cueva de los Tayos*, Ediciones de la Universidad Católica, Quito.
- 1975, *Fase Cosanga*, Ediciones de la Universidad Católica, Quito.
- 1974, *Historia y arqueología de la ciudad española Baeza de los Quijos*, Centro de Publicaciones de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.
- 1961, *Contribución a la arqueología e historia de los valles Quijos y Misaguallí (alto Napo) en la región Oriental del Ecuador*, Editorial Fénix, Quito.
- Prümers, H. *et al.* 2022, “Lidar reveals pre-Hispanic low-density urbanism in the Bolivian Amazon”, en: *Nature*,

- 606(7913), pp.: 325-328. doi:10.1038/s41586-022-04780-4
- Resco, P. *et al.* 2018, “Fotogrametría digital para el levantamiento 3D del sitio arqueológico de Todos Santos, Cuenca (Ecuador)”, en: *ESTOA*, 7(13), pp.: 25-35.
- Romero, B., y Bray, T. 2014, “Analytical applications of fine-scale terrestrial lidar at the imperial Inca site of Caranqui, northern highland Ecuador”, en: *World Archaeology*, 46(1), pp.: 25-42. doi:10.1080/00438243.2014.890910
- Rostain, S. 1997, *El Complejo XI del sitio de montículos de Huapula, nuevos datos sobre la prehistoria del Alto Upano*, Congreso Internacional de Americanistas, simposio Intercambio y Comercio en los Andes: Tierras Altas-Tierras Bajas vista desde la arqueología y la etnohistoria, Quito.
- Rostain, S. 1999^a, “Secuencia arqueológica en montículos del valle del Upano en la Amazonía Ecuatoriana”, en: *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 28(1), pp.: 53-89.
- Rostain, S. 1999^b, *Excavación en área de un montículo de Huapula, proyecto Sangay-Upano*, Memorias del Primer Congreso Ecuatoriano de Antropología, PUCE - MARKA, Quito, pp.: 227-256.
- Rostain, S. 2010, “Cronología del valle del Upano (Alta Amazonía ecuatoriana)”, en: *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 39(3), pp.: 667-681.
- Salazar, E. 1998, “De vuelta al Sangay. Investigaciones arqueológicas en el Alto Upano, Amazonía Ecuatoriana”, en: *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(2), pp.: 213-240.
- Salazar, E. 2008, “Pre-Columbian Mound Complexes in the Upano River Valley, Lowland Ecuador”, en: Silverman, H. I. *The Handbook of South American Archaeology*, New York, PP.: 263-278. Springer. doi:10.1007/978-0-387-74907-5_15
- Sánchez, A., y Álvarez, R. 2023, “Un paisaje monumental prehispánico en la Alta Amazonía ecuatoriana: primeros resultados de la aplicación de Lidar en el valle del Upano”, en: *STRATA*, 1(1), e3. doi:10.5281/zenodo.7628763
- Seeber, G. 2003, *Satellite Geodesy*, Walter de Gruyter, New York.
- Stewart, C. *et al.* 2013, “ALOS PALSAR Analysis of the Archaeological Site of Pelusium”, en: *Archaeological Prospection*, 20(2), pp.: 109-116. doi:10.1002/arp.1447
- Ulvi, A. 2022, “Using UAV Photogrammetric Technique for Monitoring, Change Detection, and Analysis of Archaeological Excavation Sites”, en: *Journal on Computing and Cultural Heritage*, pp.: 1-18. doi:10.1145/3522742
- Urban, R. *et al.* 2020, “Testing of drone DJI Phantom 4 RTK accuracy”, en: Molčíková, S. *et al.* (Eds.), *Advances and Trends in Geodesy, Cartography and Geoinformatics II*, CRC Press, London.
- Uribe, P. *et al.* 2018, “The Potential of Drones and Sensors to Enhance Detection of Archaeological Cropmarks: A Comparative Study Between Multi-Spectral and Thermal Imagery”, en: *Drones*, 2(3), 29. doi:10.3390/drones2030029
- VanValkenburgh, P. *et al.* 2020, “Lasers Without Lost Cities: Using Drone Lidar to Capture Architectural Complexity at Kuelap, Amazonas, Peru”, en: *Journal of Field Archaeology*, 45(1), pp.: 75-88. doi:10.1080/00934690.2020.1713287
- Wang, S. *et al.* 2019, “Unmanned aerial vehicle and structure-from-motion photogrammetry for three-dimensional documentation and digital rubbing of the Zuo River Valley rock paintings”, en: *Archeological Prospection*, 26(3), 265-279. doi:10.1002/arp.1739