

MODELIZACIÓN 3D CON TECNOLOGÍA VANT* PARA LA REPRODUCCIÓN Y PRESERVACIÓN DEL REGISTRO ARQUEOLÓGICO DEL PROYECTO DE GEOPARQUE LAS LORAS (PALENCIA- BURGOS)

UAV'S TECHNOLOGY FOR 3D-IMAGING AND PRESERVATION
OF THE GEOARCHEOLOGICAL RECORD IN THE LAS LORAS
GEOPARK PROJECT (PALENCIA-BURGOS)

Javier Fernández-Lozano

Facultad de Ciencias, Dpto. de Geología,
Universidad de Salamanca (USAL)
Email: jfl@usal.es

Gabriel Gutiérrez-Alonso

Facultad de Ciencias, Dpto. de Geología,
Universidad de Salamanca (USAL)
Department of Geology and Geography,
Tomsk State University
E-mail: gabi@usal.es

Asociación ARGEOL

(Karmah Salman Monte, José Ángel Sánchez Fabián
Fernando G. García)

Asociación Argeol. Proyecto Geoparque las Loras,
Aguilar de Campoo (Palencia)
E-mail: igeoloras@gmail.com

* Vehículos Aéreos No Tripulados.

RESUMEN

El uso de fotogrametría para la reconstrucción 3D, de forma rápida y eficaz, de elementos del patrimonio cultural se ha convertido en una herramienta de uso cotidiano en el mundo de la arqueología. La mejora en las técnicas de adquisición de datos y el uso de herramientas informáticas de última generación para el procesado de los mismos, permite la obtención de imágenes 3D de alta resolución. En este trabajo presentamos la documentación de dos zonas de interés arqueológico y arquitectónico muy dispares, mediante el uso de tecnología VANT, para la obtención de información tridimensional de la necrópolis neolítica de La Cabaña y el castillo de Úrbel, ambos situados en la provincia de Burgos y enmarcados dentro del Proyecto Geoparque de las Loras. En este trabajo analizamos los beneficios y dificultades que presenta el estudio de elementos del patrimonio, caracterizados por diferentes grados de conservación, geometría y dimensiones. La obtención rápida y precisa de modelos 3D mediante fotogrametría con drones de bajo coste facilita, además, la difusión al público general y promueve la protección del patrimonio, constituyendo una herramienta eficaz para la toma de datos con interés arqueológico.

Palabras clave: VANTs, patrimonio geoarqueológico, Proyecto Geoparque las Loras, Burgos, fotogrametría.

ABSTRACT

The 3D reconstruction based on photogrammetry is a reliable and fast method for documentation of cultural heritage that has received considerable attention in archaeology in recent times. The improvement of acquisition techniques and computer processing software permits the construction of high-resolution 3D models. We present the 3D documentation of two different archaeological sites using UAV-assisted photogrammetric restoration: The La Cabaña Neolithic necropolis and the Middle Age Úrbel castle, both located in the province of Burgos and included within the framework of the Geopark Project of las Loras. We analyse the benefits and difficulties for the 3D documentation of architectural elements characterized by the presence of important differences in their conservation degree, geometry or/and dimensions. The generation of 3D models from archaeological elements using cost-effective UAV-assisted photogrammetry, is, in addition, an effective tool for the digital data collection and promotes the diffusion to the general public, contributing to the protection of cultural heritage.

Keywords: UAVs, Geoarchaeological Heritage, Las Loras Geopark Project, Burgos, Photogrammetry.

1. INTRODUCCIÓN

Los drones, VANT o RPAS/UAVs (del inglés *Remotely Piloted Aircraft System o Unmanned Aerial Vehicle*) son aeronaves tripuladas por control remoto. Gracias a las mejoras técnicas y tecnológicas surgidas en los últimos años en el ámbito de la aeronáutica y la comunicación, su uso no ha parado de crecer, aumentando de forma exponencial su desarrollo en diversas disciplinas científicas. Las primeras aeronaves no tripuladas aparecieron a finales del siglo XIX, con la fabricación de los primeros misiles armamentísticos en 1898 a cargo de Nikola Tesla (el denominado teleautomatón). A partir de ese momento se realizaron toda una serie de avances encaminados al desarrollo de giroestabilizadores que facilitasen el control de la aeronave durante el vuelo. Así, en 1909 Elmer Sperry realizó con éxito algunos experimentos con giróscopos para aplicaciones marítimas. Sin embargo, hasta 1918, casi 15 años después del primer vuelo realizado por los hermanos Wright, no se produjo el primer vuelo controlado con éxito de un avión no tripulado (Cuerno-Rejado et al., 2016). A partir de ese momento, las aeronaves no tripuladas adquieren un carácter militar hasta la década de los años 70, cuando comienzan las primeras experiencias para uso civil de este tipo de aparatos (Przybilla y Wester-Ebbinghaus, 1979).

La entrada en el mercado civil de la aviación ha supuesto la necesidad de implantar una regulación a nivel europeo para garantizar la seguridad.

Organizaciones como la OTAN y Eurocontrol (EASA, European Aviation Safety Agency) trabajan desde 1999 para avanzar en un marco que permita dotar a los diferentes países europeos de una serie de recomendaciones. En España, la Agencia Estatal de Seguridad Aérea en colaboración con el Ministerio de Fomento y Defensa han adoptado e incorporado algunas de estas recomendaciones en la regulación nacional a través de la Ley 18/2014 que entró en vigor el 15 de octubre de 2014 (BOE, 2014; EASA, 2015; Díaz, 2015; Fernández-Lozano y Gutiérrez-Alonso, 2016; Cuerno-Rejado et al., 2016).

La regularización de este tipo de aeronaves ha facilitado su uso científico en campos tan dispares como la arqueología y la arquitectura, la geología, la agricultura de precisión, la monitorización del tráfico, el medioambiente, etc. (Colomina et al., 2008; Sauerbier y Eisenbeiss, 2010; Nex y Remondino, 2014; Fernández-Lozano y Gutiérrez-Alonso, 2016b). Con ello han surgido diferentes modelos de drones con características que los hacen aptos para los diferentes trabajos aéreos (i.e. drones de ala fija, ala rotatoria o mixtos, Remondino et al., 2011; Next y Remondino, 2014). Además, la fabricación de aeronaves más pequeñas, con capacidad para portar sensores cada vez más reducidos y eficientes, ha permitido grandes avances, especialmente en el mundo de la arqueología, donde hasta hace relativamente poco, el uso de topografía convencional y fotografía aérea, limitaba el estudio de restos

y otros elementos del patrimonio. La llegada de los drones, junto al acceso a la tecnología láser aerotransportado y la nueva fotogrametría digital -*Structure from Motion*- ha supuesto un rápido avance para la documentación, identificación y conservación del patrimonio cultural (Fallavollita et al., 2013; Quartermaine et al., 2014), especialmente en zonas con intensa vegetación y/o de difícil acceso. En este trabajo presentamos el uso de aeronaves no tripuladas para la documentación 3D de dos de los monumentos integrados en el Proyecto de Geoparque las Loras: la necrópolis neolítica de la Cabaña, en Sargentos de las Loras, y el castillo medieval de Úrbel, ambos situados en la provincia de Burgos. Los resultados obtenidos permitirán su estudio, conservación y difusión al público. También se incluyen una serie de recomendaciones y aspectos metodológicos que sirvan de referencia para arqueólogos e historiadores, impulsando así el uso de drones para la realización de trabajos científicos y de divulgación. Para ello se seleccionaron los mencionados elementos del patrimonio arqueológico, caracterizados por diferencias en su geometría y dimensiones, grado de conservación, complejidad en la toma de datos, etc. De esta forma se establece un marco metodológico que permita la rápida y efectiva adquisición de información digital.

2. MARCO HISTÓRICO

2.1 *La necrópolis de La Cabaña*

La necrópolis de La Cabaña se sitúa en las proximidades de Sargentos de la Lora, sobre la superficie de páramos que configuran la Lora burgalesa a 1.050 m de altura. Está constituida por cuatro dólmenes del Neolítico, datados en la segunda mitad del IV milenio (Delibes de Castro et al., 1993). Uno de ellos, el estudiado en este trabajo, está reconstruido y fue declarado Bien de Interés Cultural el 25 de agosto de 1993 por la Dirección General de Patrimonio de la Junta de Castilla y León (BOCYL, 1993). Consta de un corredor central de unos 7.5 m de longitud y una cámara funeraria de 3.7 m de diámetro constituida por una serie de ortostatos. El diámetro total de la estructura alcanza los 20 m (Fig. 1a). En el interior de la cámara funeraria se localizaron diversos objetos como puntas de flecha, cuentas de collares y restos humanos que permitieron datar el conjunto (Etxeberria y Rojo, 1994).

2.2 *El castillo medieval de Úrbel*

La fortaleza medieval de Úrbel del Castillo (provincia de Burgos), data del siglo XI y fue reformada entre los siglos XIV y principios del XV (Pérez de Urbel, 1970), está constituida por una serie de elementos arquitectónicos muy deteriorados (Fig. 1b). El conjunto destaca sobre una accidentada topografía caracterizada por resaltes rocosos

con elevada pendiente, lo que dificulta el acceso al conjunto y su estudio. Los restos conservados están formados por un torreón y un fragmento del lienzo de la muralla, así como de un muro inferior en la base y un aljibe. La torre, de planta pentagonal y alargada, está levantada en la parte más alta del promontorio. Sus muros sólo conservan 5 merlones o almenas acabadas en triángulo y dos puertas rectangulares que sugieren la presencia de cadalsos en la cara este y oeste del mismo. En el interior presenta dos arcos apuntados y unas saeteras que aún se conservan. Los estudios arqueológicos realizados indican que el castillo estaba constituido por varios niveles separados por tramos de escalinatas talladas en la roca (Barducci, 1987).

3. MÉTODO

En los últimos 5 años, el estudio, conservación y difusión del patrimonio ha dado un importante avance tecnológico, basando gran parte de su progreso en la entrada en el mercado de sensores geomáticos utilizados para la documentación del patrimonio (i.e. escáner láser, cámaras digitales, hiperespectrales, multispectrales, etc., Eisenbeiss y Zhang, 2006; Lambers y Remondino, 2007; Arias et al. 2011; Armesto-González et al. 2010; Remondino 2011; Campana et al., 2012; Remondino y Campana 2014).

Uno de los métodos más utilizados, por la flexibilidad que presenta con res-

pecto a otras tecnologías tradicionales, es la fotogrametría *Structure from Motion* (SfM), basada en la adquisición de imágenes digitales desde distintos ángulos y perspectivas. Este método ha sido implementado en drones en los últimos años con éxito (Eisenbeiss, 2004; Lambers y Remondino, 2008; Brutto y Meli, 2012; Gruen et al., 2012; Haubeck y Prinz, 2013; Daftry et al., 2015). Los fundamentos teóricos son los mismos que para la fotogrametría aerotransportada tradicional, donde para la reconstrucción de la forma y la posición de un objeto a partir de imágenes se necesita conocer la geometría del sistema que constituye la imagen (Bewley, 2003). De este modo, se considera la fotografía como la proyección central del objeto documentado. La relación entre un punto cualquiera del objeto (en el sistema de coordenadas del objeto) y un punto de la imagen (en el sistema de coordenadas de la imagen) es definido por la ecuación de colinearidad. Esta ecuación supone que, para cada punto del objeto, existe un punto en la imagen (Fig.2). Mientras que, para cada punto de la imagen, existen infinitos puntos del objeto, por lo que es necesario al menos dos imágenes para poder reconstruir un objeto (Kraus, 2007).

La transformación necesaria para la adquisición de un modelo tridimensional a partir de imágenes supone conocer su orientación interna (distancia focal de la cámara y coordenadas del punto principal en el sistema de coordenadas de la imagen) y externa (coordenadas

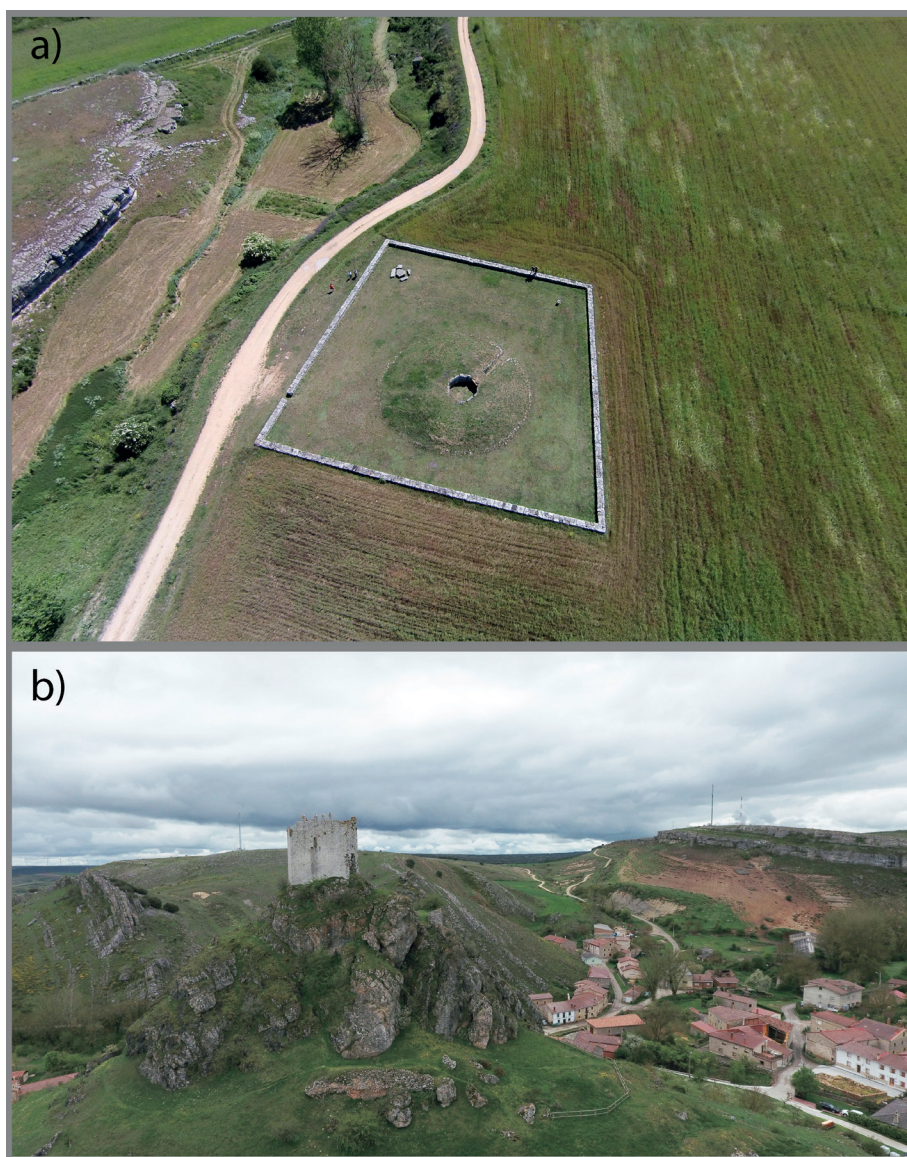


Figura 1. a) Panorámica del dolmen de La Cabaña (Sargentos de las Loras) y b) promontorio rocoso sobre el que se sitúa el castillo medieval de Úrbel.

espaciales del centro de perspectiva y los ángulos de rotación con respecto a los ejes del sistema de coordenadas del objeto). Existen dos métodos para determinar estos parámetros: mediante georreferenciación directa utilizando un GPS o Sistema de Medida Inercial (IMU) durante la captura de las imágenes; o bien utilizando puntos de control en tierra (GCP) que permitan la georreferenciación indirecta. En general, debido a la escasa precisión que presentan los GPS de consumo integrados en los drones (i.e. como resultado de retrasos ionosféricos, efecto multi-trayectoria, dilución de la precisión VDOP y HDOP que producen errores de hasta 10 m) es necesario la toma adicional de medidas en tierra que garanticen una correcta transformación de los parámetros de orientación de la imagen. Además, para poder establecer las relaciones geométricas del centro de proyección de la imagen, de manera que se pueda reconstruir el objeto a su forma y posición real, será necesario establecer la orientación relativa (mediante puntos de enlace) y absoluta (con puntos de control en tierra) (Kraus, 2007).

En la actualidad, el procesado fotogramétrico se ha simplificado gracias al uso de aplicaciones informáticas que facilitan el cálculo del ajuste de todos estos parámetros de forma automatizada, en muchos casos incluso con el uso de una única imagen (Pollefeys et al., 1999; Jizhou et al., 2004; Küng et al., 2011; Turner et al., 2012; Strecha et al. 2015). Los nuevos avances tecnológicos han permitido también impulsar el uso de

todo tipo de cámaras mediante la mejora de los algoritmos de calibración, incluyendo aquellas cámaras con lente ojo de pez que producen fuertes deformaciones, especialmente hacia los extremos de la imagen (Strecha et al., 2012; James y Robson, 2014). La calibración de la cámara debe realizarse antes del vuelo o por medio de la calibración automática, en cuyo caso es necesario la obtención de suficientes puntos de control terrestre para llevarla a cabo.

El tratamiento de las imágenes permite la adquisición de nubes de puntos densificadas a partir de las cuales se elabora, mediante interpolación, un modelo digital del terreno (DTM) y un ortomosaico de imágenes. A partir de este procesado inicial se puede adquirir el mapa de contornos y el modelo tridimensional texturizado, en función de las necesidades y el tipo de estudio arqueológico y arquitectónico que se desee realizar. La resolución de los resultados obtenidos dependerá por tanto de la calidad de la cámara utilizada (i.e. a mayor calidad de imagen, mayor resolución podremos alcanzar), la altura de vuelo (condicionada por la distancia focal de la lente de la cámara) y de los condicionante meteorológicos que permitan la toma de imágenes nítidas y sin desenfoques. Por tanto, la calidad del trabajo fotogramétrico no dependerá tanto del número de imágenes, sino de la calidad de las mismas.

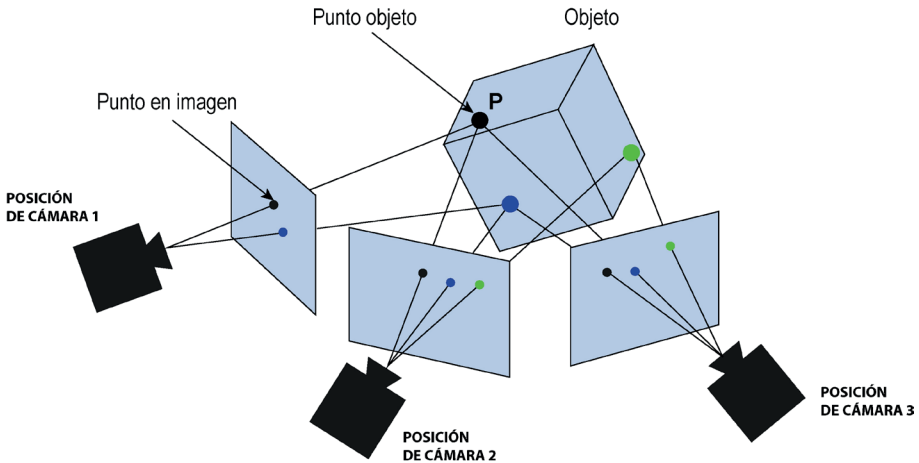


Figura 2. Fundamentos de fotogrametría *Structure from Motion*. Los distintos puntos del objeto deben presentarse al menos en dos imágenes diferentes, tomadas desde distintos ángulos y posiciones, de forma que todas ellas presenten un cierto grado de convergencia.

4. LIMITACIONES DE LOS DRONES PARA EL REGISTRO Y DOCUMENTACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO Y ARQUITECTÓNICO

En la actualidad el uso de drones se encuentra limitado principalmente por la actual normativa (BOE, 2014), que impide la realización de vuelos en núcleos urbanos, con limitaciones de altura y distancia (120 m de altura y 500 m de distancia horizontal), proximidades a aeropuertos (hasta 15 km alrededor de aeropuertos con espacio aéreo controlado) o la necesidad de contar con títulos técnicos (i.e. piloto y operador) certificados por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea. Las limitaciones de autonomía de vuelo con las que contaban estos aparatos, poco a poco se han ido reduciendo, permitiendo en

la actualidad mantenerse en el aire durante más de dos horas, gracias al uso de nuevas baterías de litio más eficaces y potentes.

Sin embargo, existen otras limitaciones que están siendo pasadas por alto en muchos trabajos arqueológicos por el desconocimiento y falta de control de parámetros básicos necesarios para la restitución fotogramétrica de las imágenes. Además de los habituales errores de recepción de la señal que presentan los GPS de consumo incluidos en los drones (en muchos casos alcanza más de 1 m de error), hay que unir otras fuentes de error como los retrasos ionosféricos, los efectos multi-trayectoria y la dilución de la precisión (vertical-VDOP y horizontal-HDOP), que pueden superar hasta 10 m de error en la medida. Estos errores producen distorsiones durante el procesado, afectando a los parámetros y ángulos de orientación

de la imagen, que van a reducir la calidad de los trabajos de forma ostensible. Por ello es necesario la utilización de puntos de control en tierra (GCP) obtenidos con estación total o GPS diferencial que permitan adquirir precisiones por debajo de los 5 cm. De esta forma obtendremos un trabajo de calidad con una elevada precisión. También es necesario tener en consideración la orografía de las zonas de trabajo (zonas de montaña, valles), las condiciones meteorológicas y lumínicas (como el viento y la presencia de sombras) que van a controlar la precisión y calidad de las imágenes tomadas y por tanto condicionarán la resolución del producto resultante.

5. DOCUMENTACIÓN 3D DEL PATRIMONIO

La obtención de información digital de alta resolución tiene un doble propósito en arqueología: el uso de material digital que permita el análisis y estudio de los elementos de interés, y su difusión. En este último caso, se puede hacer uso de herramientas de visualización tridimensional como el pdf-3D o incluso visores 3D disponibles para su integración en páginas web y aplicaciones móvil. Una de estas plataformas es Sketchfab (www.sketchfab.com), que permite la visualización de los modelos digitales obtenidos en distintos formatos y de forma gratuita. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes de los resultados obtenidos en este trabajo.

5.1 *La necrópolis de La Cabaña*

La zona de vuelo se caracterizaba por estar localizada en una planicie por encima de los 1.050 m de altura y totalmente despejada de vegetación. Para la restitución fotogramétrica del dolmen se realizaron 57 imágenes a una altura de 50 m sobre la superficie y una resolución de 2.36 cm/píxel. El trabajo cubría una superficie de 0.6 hectáreas y se establecieron 5 puntos de control (GCP) con un error medio de 17 centímetros. La aeronave utilizada fue un dron cuadricóptero de 59 cm de ala con batería Lipo y una autonomía de 20 minutos. El vuelo realizado se llevó a cabo en 15 minutos y de forma automática, siendo planificado previamente con software de la estación de control en tierra (GCS). Desde la aplicación se controló en todo momento la velocidad del vuelo (2 m/s), el ángulo de la cámara (cenital) y la trayectoria de la aeronave (Fig. 3a). El procesado fotogramétrico se realizó posteriormente en gabinete, obteniéndose los siguientes productos: una nube de puntos densificada a partir de la cual se elaboró el modelo digital del terreno (DTM) y el ortomosaico. La texturización del modelo permitió la obtención de un modelo fotorealístico escalado (Fig. 4a, Fernández-Lozano et al., 2015). El modelo texturizado es accesible desde la aplicación Sketchfab, disponible para móviles e internet: <https://skfb.ly/PqLX>.

5.2 *El castillo medieval de Úrbel*

El trabajo aéreo realizado se desarrolló sobre un resalte rocoso de más de 30 m de altura. La roca caliza sobre la que se asienta el castillo está fuertemente fracturada, generando zonas estrechas de difícil acceso y en muchos casos cubiertas de vegetación. Debido a la altura de la torre ≈ 10 m y a la dificultad de acceso por uno de los laterales, por la fuerte pendiente, el trabajo se realizó desde una zona de topografía suave sobre una plataforma situada a 30 m de altura por debajo de la base de la atalaya y con un ángulo de visión de la estructura de unos 200° , obligando a la realización del vuelo de forma manual y desde diferentes puntos alrededor de la estructura (Fig. 3b). Para poder captar las roturas de pendiente, grietas y posibles zonas de sombra, se realizaron vuelos a distintas alturas con una distancia de toma de 15 m en la vertical y la horizontal. Se tomaron 279 imágenes con una distancia de muestreo media tras el procesado < 5 cm. El tiempo de vuelo alcanzó los 30 minutos. El cuadricoptero utilizado presentaba un sistema de seguridad por sensor radar de aproximación frontal y cenital que permitía mantener el aparato estable en el aire incluso en condiciones de viento (> 20 m/s). La superficie total cubierta alcanzó 1 hectárea. Al igual que en el caso anterior se obtuvo una nube de puntos densificada y georeferenciada a partir de la cual se generó un modelo digital y un ortomosaico. Para la difusión del modelo se extrajo un 3D texturizado del mismo (Fig.4b). El modelo

3D del castillo puede visualizarse desde la plataforma Sketchfab: <https://skfb.ly/PqrL>.

6. RECOMENDACIONES SOBRE EL USO DE DRONES PARA LA DOCUMENTACIÓN DIGITAL DE ELEMENTOS DEL PATRIMONIO

El uso de fotogrametría asistida por drones para la captura de información digital de elementos del patrimonio arqueológico proporciona ciertas ventajas con respecto a otro tipo de métodos de documentación, como el láser o la fotogrametría terrestre. A diferencia del láser, con mayor capacidad para capturar superficies, la fotogrametría permite adquirir bordes y texturas, lo que la hace especialmente útil para recrear monumentos y ambientes (Lambers y Remondino, 2007). El uso de este tipo de aeronaves permite además volar próximo a los objetos de interés, incrementando la resolución de los datos obtenidos. La posibilidad de acceder a zonas inaccesibles muy vegetadas o con peligro expuesto para los técnicos, como acantilados, edificios, etc., abre nuevas posibilidades para su aplicación en trabajos arqueológicos y arquitectónicos, como ponen de relevancia trabajos recientes en condiciones técnicas muy diversas (Eisenbeiss y Sauerbier, 2011).

Los trabajos realizados por Lambers y Remondino (2007), Coder (2013) y Daftry et al. (2015) sugieren toda una serie de ventajas de la medición óptica

3D. Al tratarse de una técnica no invasiva, que tiene la posibilidad de ser aplicada a diferentes escalas, facilita la adquisición de información de forma rápida y segura durante el mismo proceso de estudio arqueológico o excavación. Los drones permiten combinar diferentes sensores para trabajar a diferentes escalas y con diferentes resoluciones (Balleti et al., 2015; Themistocleous et al. 2015; Fernández-Lozano y Gutiérrez-Alonso, 2016a). En la actualidad el mercado civil de aeronaves no tripuladas presenta una gran variedad de tipos: si bien es cierto que las aeronaves de ala fija tienen una mayor autonomía y capacidad para cubrir superficies amplias de terreno (pueden recorrer hasta 60 km y mantenerse en el aire durante más de 1 hora), para trabajos en superficies pequeñas y con dificultades de acceso y maniobrabilidad bajas, las aeronaves de ala rotatoria han mostrado una mayor capacidad de trabajo. Para la gran mayoría de los trabajos arqueológicos y arquitectónicos de pequeña y gran escala, estos últimos se han mostrado más versátiles.

La documentación digital 3D y la reconstrucción virtual de elementos arquitectónicos con fotogrametría *Structure from Motion* se presenta como una forma de adquirir imágenes de forma rápida y económica, conteniendo toda la información necesaria para la reproducción tridimensional de objetos. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran la capacidad de las aeronaves de ala rotatoria para el estudio de estructuras arquitectónicas. En zonas con

escasa topografía, como en el ejemplo del dolmen de La Cabaña, donde no existe complejidad técnica ni exceso de topografía o vegetación, se pueden realizar vuelos autónomos con grilla que ofrecen buenos resultados incluso en condiciones meteorológicas complicadas (rachas de viento > 25 m/s), donde la seguridad del vuelo y la toma de imágenes podrían verse comprometidas en otras condiciones técnicas.

En el caso de la documentación del castillo medieval de Úrbel, la complejidad técnica que supone trabajar en una zona montañosa, con cambios bruscos en las condiciones meteorológicas, la escala del proyecto (mucho mayor que en el caso anterior), la forma irregular de la estructura a estudiar y las fuertes variaciones de desnivel hasta 30 m, supone una serie de retos técnicos a tener en cuenta. La presencia de arbustos y fracturas generan zonas de sombra (donde podría comprometerse la toma de información digital desde imágenes) y la irregular geometría del monumento, más compleja (caracterizada por picos, salientes, etc.), obligó a realizar un vuelo manual con la aeronave. Para poder adquirir información desde distintos ángulos en elementos con fuertes variaciones de topografía, es recomendable realizar varios vuelos a distintas alturas y variando la distancia al elemento, especialmente en zonas con resaltes verticales (i.e. planos de fractura).

Para poder asegurar un correcto procesado y establecer de forma precisa los parámetros de orientación interna

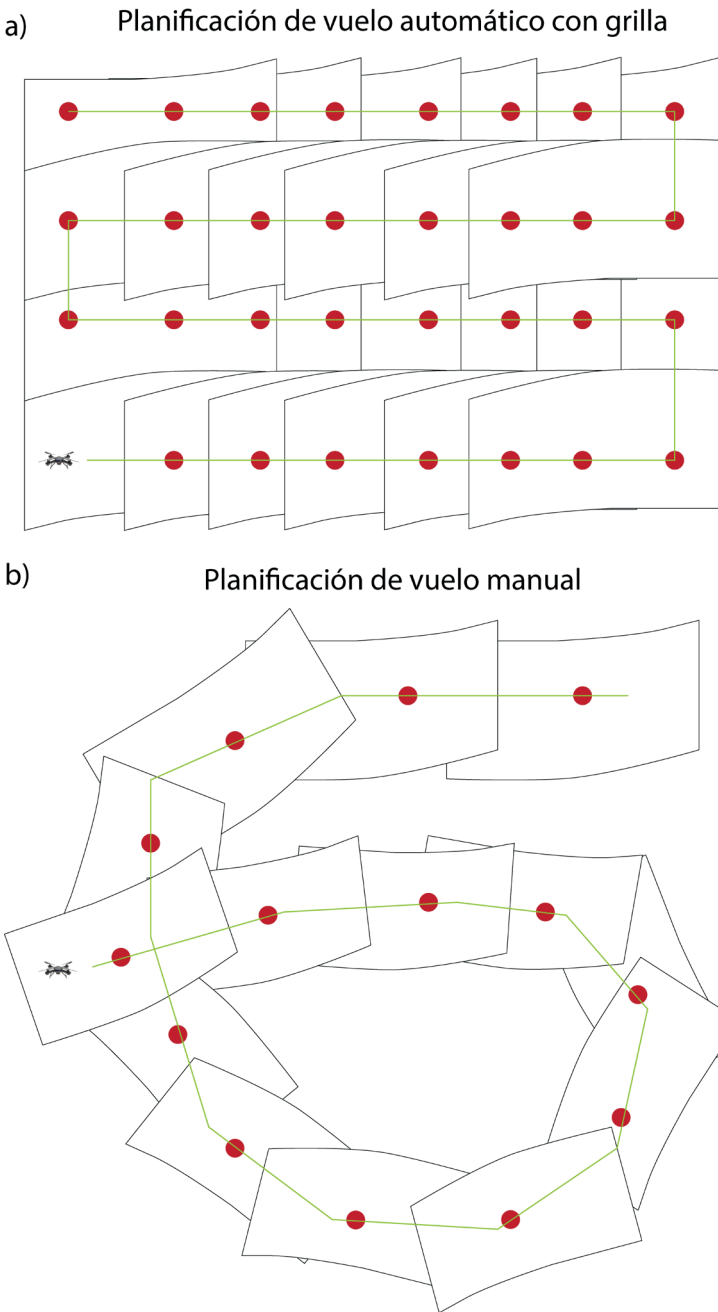


Figura 3. Modos de planificación de vuelo. a) automático con grilla para la documentación del dolmen de La Cabaña y b) manual para el castillo medieval de Úrbel.

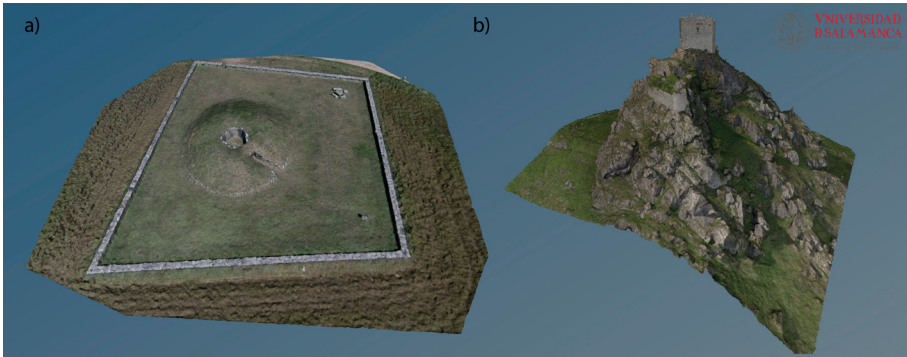


Figura 4. Modelos fotorealísticos. a) Dolmen de La Cabaña (Sargentos de las Loras, Burgos) y b) castillo de Úrbel (Úrbel del Castillo, Burgos).

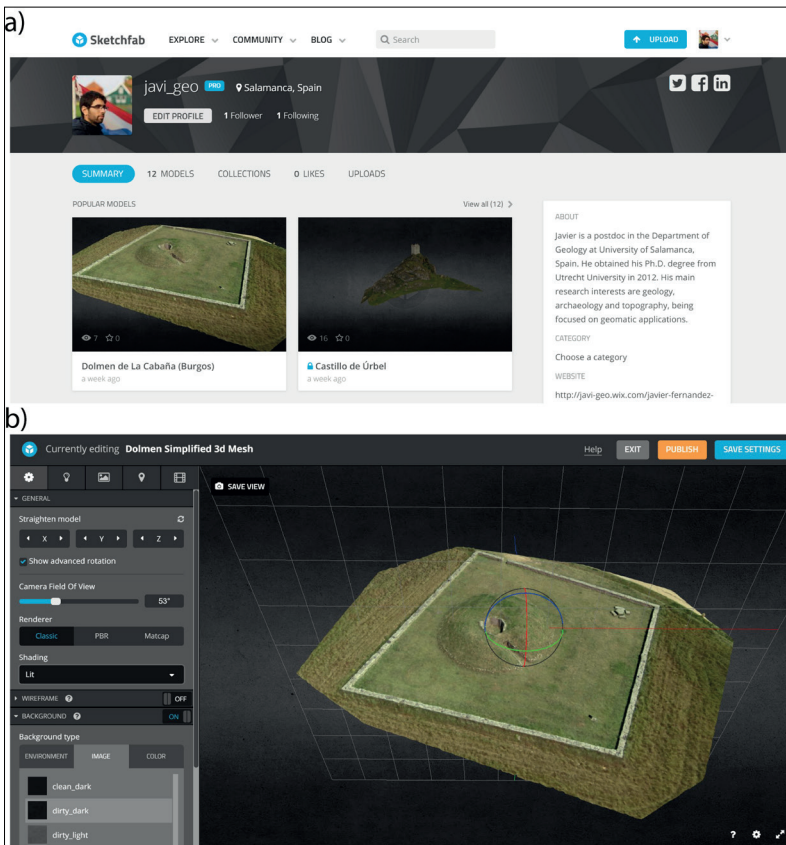


Figura 5. Plataforma de visualización de modelos 3D texturizados Sketchfab*. a) Interfaz del visor de modelos y b) modificación de parámetros de visualización dentro de la aplicación.

y externa, relativa y absoluta para el tratamiento fotogramétrico de las imágenes se requiere del uso de puntos de control terrestre (GCP). Estos serán tomados antes o después de la ejecución del vuelo y utilizados posteriormente durante el trabajo de gabinete. La toma de los puntos debe realizarse con el uso de GPS diferencial o estación total que permita asegurar una precisión centimétrica y reduzca así las distorsiones generadas durante el procesado. Además, para obtener un procesado de calidad es recomendable aumentar el solapamiento de imágenes y reducir los problemas derivados del ajuste que se produce durante el procesamiento (debido a deformaciones producidas por el tipo de lente de la cámara, como distorsión radial, dómica o efecto ojo de pez), especialmente en zonas con topografía variable (donde la altura de vuelo es también variable), se recomienda realizar varias pasadas alrededor del objeto variando el ángulo de la cámara (óptimo entre 35° y 45°, para trabajos verticales), como sugieren trabajos recientes (James y Robson, 2014).

La entrada de drones en el mercado con sistemas de seguridad o sensores de distancia basados en ultrasonidos y sensores visuales facilitan la toma de imágenes en trabajos verticales, al mantener la distancia de seguridad con respecto al objeto, permitiendo centrar la atención en la toma de imágenes alrededor de la estructura. Estos sistemas de seguridad ya vienen incorporados en los nuevos aparatos y simplifican enormemente el trabajo técnico, au-

mentando la seguridad del vuelo al evitar posibles impactos.

Los ejemplos analizados en este trabajo ponen de manifiesto la complejidad de los trabajos fotogramétricos para la captura de información digital 3D. Las numerosas variables que influyen en la precisión y resolución de los datos adquiridos requieren de la pericia técnica y una serie de consideraciones previas que ayuden mejorar los resultados. La información obtenida presenta un gran interés para el estudio y preservación del patrimonio por el valor científico que aporta a arqueólogos e historiadores. Las recomendaciones ofrecidas dependen de las distintas condiciones de vuelo, el relieve, el objeto de estudio y su geometría, así como de la meteorología entre otros, por lo que cada zona de trabajo puede requerir de medidas especiales a tener en cuenta. Sin embargo, se han planteado dos casos tipo que ofrecen soluciones para una gran variedad de trabajos arqueológicos.

Para aumentar la difusión y el impacto que generan este tipo de trabajos arqueológicos y potenciar el acercamiento e interacción con el público, se recomienda el uso de plataformas de visualización 3D como Sketchfab®. Este tipo de herramientas digitales permite integrar los modelos y facilita la preservación de elementos del patrimonio localizados en zonas de difícil acceso o en peligro de desaparición, siendo una opción de reclamo turístico para centros de interpretación o parques arqueológicos, donde los modelos

fotorealísticos pueden ser incluidos en aplicaciones para móvil y tableta, además de páginas web (Fig.5).

7. CONCLUSIONES

Los drones son aeronaves tripuladas por control remoto que permiten el estudio y documentación 3D de restos del patrimonio arqueológico y arquitectónico vulnerable, afectados por el desgaste y la destrucción. Entre las características que los hacen tan versátiles para este tipo de trabajos aéreos, la rapidez, eficacia y el bajo coste que presentan han impulsado su uso para la captura de información científica y la difusión de elementos de patrimonio en zonas de difícil acceso o donde el estado de conservación del mismo no permite la exposición directa al público. Sin embargo, es necesario tener presente una serie de recomendaciones que simplifiquen la adquisición de la información digital sin comprometer la seguridad, la precisión y la resolución de los resultados finales obtenidos. A todo ello contribuyen, de manera significativa, el desarrollo de nuevas plataformas, como Sketchfab*, que permiten la visualización tridimensional de los resultados en aplicaciones móviles e internet, facilitando el acceso a la documentación, garantizando su preservación y adquiriendo un valor añadido como reclamo turístico en parques temáticos y centros de interpretación arqueológica.

REFERENCIAS

- ARIAS, P., GONZÁLEZ-AGUILERA, D., RIVEIRO, B., CAPARRINI, N. (2011). Orthoimage-based documentation of archaeological structures: The case of a Mediaeval wall in Pontevedra, Spain. *Archaeometry*, 53(4), 858-872.
- ARMESTO-GONZÁLEZ, J., RIVEIRO-RODRÍGUEZ, B., GONZÁLEZ-AGUILERA, D., RIVAS-BREA, M.T. (2010). Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3037-3047.
- BALLETI, C., GUERRA, F., SCOCCA, V., GOTTARDI, C. (2015). 3D integrated methodologies for the documentation and the virtual reconstruction of an archaeological site. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 215.
- BARDECI, I.C. (1987). *Arquitectura fortificada en la provincia de Burgos*. Excma. Diputación Provincial. 270 pp.
- BEWLEY, R.H. (2003). Aerial survey for archaeology. *The Photogrammetric Record*, 18(104), 273-292.
- BOCYL (1993). DECRETO 201/1993, de 25 de agosto, de la Junta de Castilla y León, por el que se declara Bien de Interés Cultural con categoría de Zona Arqueológica a favor del Dolmen «La Cabaña», en Sargentos de la Lora (Burgos). *Boletín Oficial de Castilla y León*. BOCYL. 167.
- BOE (2014). Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia. BOE: 83976- 83982.

- BRUTTO, M.L., MELI, P. (2012). Computer vision tools for 3D modelling in archaeology. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(1 suppl), 1-6.
- CAMPANA, S., SORDINI, M., BIANCHI, G., FICHERA, G., LAI, L. (2012). 3D recording and total archaeology: From landscapes to historical buildings. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(3), 443-460.
- CODER, P.O. (2013). Digitalización automática del patrimonio arqueológico a partir de fotogrametría. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), 46-49.
- COLOMINA, I., BLAZQUEZ, M., MOLINA, P., PARÉS, M., WIS, M. (2008). Towards a new paradigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, Part B1, pp. 1201-1206.
- CUERNO-REJADO, C.C., HERNÁNDEZ, L.G., CARMONA, A.S., FERNÁNDEZ, A. C., LÓPEZ, J.L.S., CERVERA, P.C. (2016). Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad. *Dyna*, 91(3), 282-288.
- DAFTRY, S., HOPPE, C., BISCHOF, H. (2015). Building with drones: Accurate 3d facade reconstruction using mavs. In *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 3487-3494). IEEE.
- DELIBES DE CASTRO, G., ROJO-GUERRA, M., REPRESA-BERMEJO, I. (1993). Dólmenes de la Lora. Salamanca, Junta de Castilla y León. *Consejería de Cultura y Turismo*, 11-12.
- DÍAZ, E.D. (2015). Uso legal de drones. *Mapping*, 172: 42-54.
- EASA (2015). Proposal to create common rules for operating drones in Europe. https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/205933-01-EASA_Summary%20of%20the%20ANPA.pdf [Accedido el 17/06/2016, 1-8].
- EISENBEISS, H., SAUERBIER, M. (2011). Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*, 26(136), 400-421.
- EISENBEISS, H., ZHANG, L. (2006). Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-5*, 90e96.
- EISENBEISS, H. (2004). A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/W1).
- ETXEBERRÍA, F., ROJO, M. (1994). Diente humano perforado procedente del megalito de La Cabaña (Sargentos de La Lora, Burgos): un ejemplo de tafonomía. *Munibe. Ciencias naturales*, 46, 117-122.
- FALLAVOLLITA, P., BALSÌ, M., ESPOSITO, S., MELIS, M.G., MILANESE, M., ZAPPINO, L. (2013). Uavs for archaeology. New perspectives on aerial documentation. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1(2), 131-135.
- FERNÁNDEZ-LOZANO, J., GUTIÉRREZ-ALONSO, G. (2016a). Improving archaeological prospection using localized UAVs assisted photogrammetry: An example from the Roman Gold District of the Eria River Valley (NW Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5, 509-520.

- FERNÁNDEZ-LOZANO, J., GUTIÉRREZ-ALONSO, G., (2016b). Aplicaciones geológicas de los drones. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29(1), 89-105.
- FERNÁNDEZ-LOZANO, J., GUTIÉRREZ-ALONSO, G., SALMAN-MONTE, K., SÁNCHEZ-FABIAN, J.A., GARCÍA, F. (2015). Tecnología VANT de bajo coste para reproducción 3D y preservación del registro arqueológico del proyecto de Geoparque las Loras (Palencia-Burgos). *Mapping*, (172), 4-11.
- GRUEN, A., ZHANG, Z., EISENBEISS, H. (2012). UAV photogrammetry in remote areas—3D modeling of Drapham Dzong, Bhutan. *ISPRS—Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.*, 39, B1.
- HAUBECK, K., PRINZ, T. (2013). A UAV-Based Low-Cost Stereo Camera System for Archaeological Surveys—Experiences from Doliche (Turkey). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 195-200.
- JAMES, M.R., ROBSON, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), 1413-1420.
- JIZHOU, W., ZONGJIAN, L., CHENGMING, L. (2004). Reconstruction of buildings from a single UAV image. In *Proc. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress* (pp. 100-103).
- KRAUS, K. (2007). *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. Walter de Gruyter, Göttingen, Germany, 459pp.
- KÜNG, O., STRECHA, C., BEYELER, A., ZUFFEREY, J. C., FLOREANO, D., FUA, P., & GERVAIX, F. (2011). The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. In *UAV-g 2011-Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics* (No. EPFL-CONF-168806).
- LAMBERS, K., REMONDINO, F. (2007). Optical 3D measurement techniques in archaeology: recent developments and applications.
- NEX, F., REMONDINO, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15.
- PÉREZ DE URBEL, J.P. (1970). *El Condado de Castilla: los 300 años en que se hizo Castilla* (Vol. 2). Editorial Siglo Ilustrado. 319 pp.
- POLLEFEYS, M., KOCH, R., GOOL, L.V. (1999). Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters. *Int. Journal of Computer Vision* 32(1), pp. 7–25
- PRZYBILLA, H.J., WESTER-EBBINGHAUS, W. (1979). Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 47(5), 137-142.
- QUARTERMAINE, J., OLSON, B.R., KILLEBREW, A.E. (2014). Image-Based Modeling Approaches to 2D and 3D Digital Drafting in Archaeology at Tel Akko and Qasrin: Two Case Studies. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies*, 2(2), 110-127.
- REMONDINO, F., CAMPANA, S. (Eds.). (2014). *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and best practices*. Oxford, UK: Archaeopress.
- REMONDINO, F., BARAZZETTI, L., NEX, F., SCAIONI, M., SARAZZI, D. (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.

- REMONDINO, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104-1138.
- SAUERBIER, M., EISENBEISS, H. (2010). UAVs for the documentation of archaeological excavations. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 5), 526-531.
- STRECHA, C., ZOLLER, R., RUTISHAUSER, S., BROTH, B., SCHNEIDER-ZAPP, K., CHOVANCOVA, V., KRULL, M., GLASSEY, L. (2015). Terrestrial 3D mapping using fisheye and perspective sensors. 1-9.
- STRECHA, C., KÜNG, O., FUA, P. (2013). Automatic mapping from ultra-light uav imagery. In *EuroCOW 2012* (No. EP-FL-CONF-175351).
- THEMISTOCLEOUS, K., AGAPIOU, A., HADJIMITSIS, D.G. (2015). Unmanned Aerial Systems And Spectroscopy For Remote Sensing Applications In Archaeology. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(7), 1419.
- TURNER, D., LUCIEER, A., WATSON, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*, 4(5), 1392-1410.