

# Análisis comparativo del levantamiento del terreno mediante UAS y topografía clásica en proyectos de trazado de carreteras

## *Comparative analysis of the land survey using UAS and classical topography in road layout projects*

Juan Antonio Pérez<sup>(\*)</sup>, Gil Rito Gonçalves<sup>(\*\*)</sup>, Jesus Montilla Galván<sup>(\*\*\*)</sup>

### RESUMEN

La incorporación de vehículos aéreos no tripulados (UAS) como alternativa a los levantamientos topográficos clásicos ha experimentado en estos últimos años un gran avance en todos los ámbitos de la ingeniería, dado que permiten una rápida y eficaz generación de diferentes productos fotogramétricos (nube de puntos, modelo digital del terreno, ortofotos), a la vez que favorecen una reducción de los costes. Para demostrar las posibilidades que nos ofrecen los UAS en el ámbito de la ingeniería civil, se presenta aquí un estudio en el que se comparan los resultados obtenidos entre un levantamiento topográfico clásico y otro efectuado con estos medios aéreos, que será la base topográfica que permita realizar el proyecto de construcción de una carretera. Los resultados experimentales revelan que el uso combinado de datos UAS y topografía clásica proporcionan una generación exitosa de los productos.

**Palabras clave:** UAS, SfM, MVS, líneas de rotura, eliminación de ruido, precisión, MDT.

### ABSTRACT

*Nowadays, the use of unmanned aerial vehicles (UAS) as a technological alternative to classical topographic surveys has experienced great progress in all areas of engineering. While being cost-effective, they allow a rapid and efficient generation of three main photogrammetric products: cloud points, digital terrain models and orthophotos. To evaluate the effectiveness of UAS in the field of civil engineering, a comparison between a classic topographic survey and an UAS survey is presented, with the assumption that both surveys will give the basic topographic data necessary to carry out a highway construction project. The experimental results reveal that the combined use of UAS data and classical topography provides a successful generation of the products.*

**Keywords:** MDT UAS, SfM, MVS, break lines, vegetation, DTM.

(\*) Profesor departamento de Expresión Gráfica, Universidad de Extremadura, Mérida (España).

(\*\*) Profesor, University of Coimbra, Coimbra, Portugal; Institute for Systems Engineering and Computers at Coimbra, Coimbra, (Portugal).

(\*\*\*) Investigador predoctoral, Universidad de Extremadura, Mérida (España).

Persona de contacto/Corresponding author: [japerez2611@gmail.com](mailto:japerez2611@gmail.com) (J.A. Pérez)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7081-5200> (J.A. Pérez); <http://orcid.org/0000-0002-1746-0367> (G.R. Gonçalves); <http://orcid.org/0000-0002-3314-7012> (J. Montilla-Galván)

---

**Cómo citar este artículo/Citation:** Juan Antonio Pérez, Gil Rito Gonçalves, Jesus Montilla Galván (2022). Análisis comparativo del levantamiento del terreno mediante UAS y topografía clásica en proyectos de trazado de carreteras. *Informes de la Construcción*, 74(565): e431. <https://doi.org/10.3989/ic.86273>

**Copyright:** © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 25/11/2020  
Aceptado/Accepted: 08/06/2021  
Publicado on-line/Published on-line: 25/03/2022

## 1. INTRODUCCIÓN

El gran avance tecnológico experimentado en los últimos tiempos, ha posibilitado la incorporación de Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS, “Unmanned Aerial System”) como una alternativa a los tradicionales levantamientos llevados a cabo por topografía o aerofotogrametría clásica. La combinación de técnicas fotogramétricas junto a UAS ha aumentado considerablemente a nivel mundial, debido a la utilización de estas nuevas tecnologías basadas en sensores remotos instalados sobre este tipo de vehículos que permiten adquirir imágenes de manera rápida, asequible y eficaz, con el fin de generar datos tridimensionales de alta resolución.

En la actualidad, los vehículos aéreos no tripulados más extendidos están equipados con receptores GNSS, ayudados por Unidades de Navegación Inercial (IMU) y cámaras no métricas. El uso conjunto de estos aparatos junto con el software de bajo coste basados en algoritmos Structure for Motion (SfM) y en Multi-View Stereo (MVS), hacen cada vez más competitiva a la fotogrametría UAS frente a los tradicionales levantamientos topográficos sobre pequeñas y medianas superficies.

El uso de este tipo de herramientas se ha incrementado notablemente en numerosos campos de la ingeniería, así, por ejemplo, en la realización de mapas (1-3), detección de objetos (4, 5), cuantificación de cambios topográficos (6, 7), monitoreo topográfico de líneas de costas y dunas (8-10), construcción (11-13), etc. Una descripción detallada del estado del arte se puede encontrar en diversas publicaciones (14-16).

En la redacción y ejecución de cualquier proyecto de ingeniería civil, se usa como material básico los mapas topográficos, Modelo Digital de Elevaciones (MDE), nube de puntos, Modelo Digital del Terreno (MDT), ortofotos, etc., y cualquier otro tipo de documento geoespacial que permita extraer la información necesaria para tales fines. Hasta ahora, estos datos eran recopilados a partir de levantamientos topográficos tradicionales (GNSS, estación total, etc.), fotogrametría aérea, cartografía, etc. No obstante, el éxito que está teniendo actualmente la combinación de UAS y fotogrametría en la captura de estos datos, hace que se imponga cada vez más su uso, debido principalmente a la reducción de costes, facilidad de uso, flexibilidad y mejora de las resoluciones espaciales y temporales (17). No obstante, todas estas ventajas no son tales si los resultados que se obtienen no cumplen con los estándares cartográficos actuales.

En este trabajo se va a comparar el MDT obtenido por topografía clásica con instrumentación GNSS con el producto topográfico derivado de la información capturada mediante UAS. Analizaremos la calidad posicional del MDT generado a partir de imágenes de alta resolución adquiridas con un UAS mediante la georreferenciación de puntos de apoyos (PA) terrestre.

Nos centraremos en el análisis de la componente altimétrica, ya que existen numerosas publicaciones en las que se exponen que los mayores errores en la generación de los MDE derivados de un UAS se producen en dicha componente (18-23).

El objetivo de este trabajo será evaluar el potencial de estas herramientas, realizando un estudio de la viabilidad de los productos fotogramétricos obtenidos con UAS en el área de la ingeniería civil concretamente en la captura topográfica base para el diseño de una carretera.

## 2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra situada en el término municipal de Llerena, provincia de Badajoz (España) y el trabajo se ha realizado con motivo de la redacción del proyecto de la construcción de la variante EX-103 a su paso por Llerena (Figura 1).

El trazado de la variante tiene una longitud de aproximadamente 6,6 km, con una calzada proyectada de siete metros con arcenes de metro y medio y bermas de medio metro. La superficie ocupada es de aproximadamente 140 Has y contiene una amplia tipología de características que la hacen adecuada para la realización de este trabajo, así se pueden encontrar cambios bruscos de pendiente, zonas llanas con tonalidades uniformes, zonas con diferentes tipos de vegetación, arroyos, caminos, carreteras, vías de ferrocarril y zonas con masas de agua.

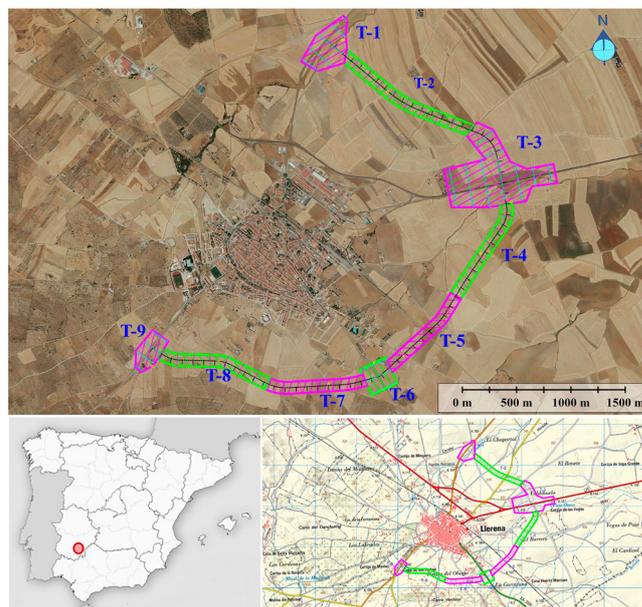


Figura 1: Variante de Llerena y distribución de vuelos en tramos sobre la zona de trabajo.

## 3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron dos receptores Leica System 1200 bifrecuencia, drone DJI Phantom 4 Pro, software MisionPlanner (MP), DJI GS Pro (DJI\_GS), Agisoft Metashape Pro V1.6, Sistema de Información Geográfica Gv-SIG 2.5, Civil 3D 2017 y TcPMDT 7.5.

A continuación se describen los trabajos realizados para contrastar la información geoespacial capturada por diferentes metodologías y evaluar las precisiones obtenidas, con el fin de poder validar o no la metodología de trabajo con UAS.

Lo primero que se hizo fue una toma de datos topográficos en campo mediante un levantamiento cinemático en tiempo real (RTK) apoyándonos en una colección de bases de replanteo proporcionadas por la administración. La zona de afección fue de aproximadamente 50 metros a cada lado de la traza, amplián-

dose en las zonas de intersección con las vías principales (carreteras, caminos, ferrocarril, etc.). Con estos datos se generó el Modelo por Topografía Clásica (MTC) a escala 1:1000 y equidistancia 0,5 m que servirá de base para realizar la comparativa.

Definido este modelo, se realizó la planificación del vuelo, de los PA y su captura topográfica en campo, utilizando idéntica metodología que la empleada para el MTC. Posteriormente se efectuó la ejecución del vuelo, el procesamiento fotogramétrico de las imágenes, postproceso de los resultados y el análisis posicional final de los resultados obtenidos.

Como se expuso en la introducción, es inevitable realizar una comparativa entre el modelo obtenido por topografía clásica y los productos fotogramétricos obtenidos, especialmente la nube de puntos obtenida con UAS, que será la base del modelo de elevaciones.

Un primer chequeo consistió en comparar los perfiles longitudinales generados a partir de los datos UAS y topográfico de campo. Con el objetivo de realizar el estudio lo más exhaustivo posible, se crearon cinco modelos con diferentes características a partir de los datos capturados con UAS.

A partir de los resultados obtenidos en esta primera comparativa y con el fin de detectar donde se producen los mayores errores, se realizó un análisis por puntos kilométricos. Para ello, se incorporó a la ortofoto generada con una resolución de 3 cm el eje de la carretera, acotándolo cada 20 metros, con el objetivo de identificar y tener una referencia visual de cada uno de los puntos que definen el perfil longitudinal del terreno.

Como resultado de esta identificación, se localizaron zonas con diferencias altimétricas anómalas. Por ello, se realizó una nueva comparativa consistente en la realización de un replanteo del eje de la traza y captura de las coordenadas, con equipo GNSS.

### 3.1. Planificación de los vuelos

Definido el modelo cartográfico adquirido por topografía clásica con GNSS, el cual servirá de base para realizar nuestra comparativa, los siguientes trabajos realizados fueron los encaminados a la captura aérea de imágenes y su procesamiento.

Como en cualquier trabajo fotogramétrico, estos comienzan con la realización de un planeamiento de vuelo, que proporciona cobertura fotográfica de la zona objeto de estudio. En la planificación de los vuelos se ha seguido el diseño general de la fotogrametría aérea (24) con el objetivo de obtener una cobertura fotográfica adecuada en el menor tiempo posible.

Para la definición de la geometría del bloque fotogramétrico se eligieron recubrimientos generales estándar recomendables (18, 19) en vehículos aéreos no tripulados. Estos han sido, longitudinal del 80% y transversal del 60%. La altura media de vuelo varió entre 80 a 85 metros, función de los desniveles del terreno, con el fin de obtener una distancia entre el centro de dos píxeles consecutivos en el terreno, Ground Simple Distance (GSD) de aproximadamente 2cm.

Debido a la extensión de la zona de trabajo y a la autonomía de vuelo de los drones (25 min) se realizaron dos tipos de planificación según la superficie a cubrir, obteniéndose un total de 9 vuelos (Figura 1), denominados tramos del T-1 al T-9.

Una primera, para aquellos tramos en los que la nueva traza intersectaba con vías principales (T-1, T-3; T-6 y T-9) y en los que fue necesario aumentar la superficie de cobertura topográfica. Los planeamientos se ejecutaron con ejes de vuelo de cada pasada paralelas entre sí, utilizando el software DJI\_GS.

La segunda fue para aquellos tramos en los que la única zona de afección era la traza y el ancho de actuación proyectado (T-2, T-4, T-5, T-7 y T-8), siendo los vuelos definidos por una única pasada, desde un punto de salida otro de llegada y todos aquellos puntos interiores que se adaptaron a la traza definida en proyecto. Todos los tramos fueron diseñados con zonas comunes para la unión entre ellos. Se utilizó el software MP para definir los ejes de vuelo adaptando la trayectoria de vuelo a la orografía del terreno. Determinados los vuelos en esta aplicación, se trasladaron cada tramo a la aplicación DJI\_GS, para gestionar las operaciones debido a la compatibilidad con la plataforma aérea utilizada en el vuelo, Phantom 4 Pro.

### 3.2. Toma de puntos de apoyo y ejecución de los vuelos

Finalizada la fase de planificación, el siguiente paso fue la realización de los trabajos de campo necesarios para dotar a cada tramo del suficiente número de PA de posición espacial conocidos sobre el terreno.

Antes de la ejecución de los vuelos, fue necesario colocar las marcas que servirían de puntos de control sobre la zona objeto de estudio, asegurándonos de esta forma que aparezcan en la mayor parte de las fotografías, garantizando de este modo una distribución geométrica eficiente y homogénea del apoyo.

La distribución del apoyo en cada tramo se planificó previamente a su marcación en campo, estudiando las ubicaciones más idóneas en gabinete, siguiendo criterios de distancia y reparto homogéneo en el perímetro de cada uno de los tramos (18, 24), incluyendo puntos en el interior (25) y apoyos comunes en las zonas de solape de cada tramo para garantizar la unión al finalizar el ajuste (Figura 2). Como resultado de ello, se utilizaron cadenas de 3-6 PA espaciales distribuidos aproximadamente cada 150 metros a lo largo de los bloques fotogramétricos (Figura 2).

Posteriormente se procedió a la marcación en campo al mismo tiempo que se medían las coordenadas con equipo GNSS. Las marcas se materializaron en forma de cruz de dimensiones aproximadas a 18x18 cm, con diferentes colores, para conseguir una eficiente identificación radiométrica y óptima medición.

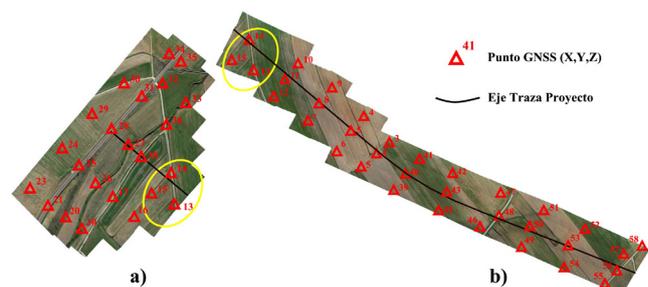


Figura 2. Distribución de puntos de apoyo para tramo T-1 (a), T-2 (b) y puntos comunes entre tramos.

Se midieron y calcularon las coordenadas de un total de 224 PA repartidos entre los nueve tramos (Tabla 1), utilizando el sistema de referencia de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), Huso 29 Norte y Datum ETRS89 (European Terrestrial Reference System of 1989).

Acabada la fase de distribución y medición del apoyo fotogramétrico, se procedió a la ejecución del vuelo fotogramétrico planificado previamente. Los vuelos se realizaron a finales de diciembre, al mediodía, cuando la altitud del sol era la óptima para minimizar el efecto de las sombras arrojadas.

### 3.3. Procesamiento de datos

El procesamiento fotogramétrico de cada caso se realizó utilizando algoritmos de correspondencia de imágenes basados en técnicas SfM y MVS. El flujo de trabajo ampliamente expuesto en numerosas publicaciones (26-28), consiste básicamente en la búsqueda de puntos homólogos en todas las imágenes, realización de la orientación relativa y posterior orientación absoluta con los puntos de posición conocida, PA. Una vez definida la posición y orientación de las cámaras en el espacio y sus parámetros internos, se captura la nube de puntos densa mediante MVS y se clasifica. A continuación, se genera una malla texturizada 3D, el modelo digital de superficie y el ortomosaico georeferenciado.

El software Metashape proporciona un flujo de trabajo simple, no obstante, presenta el problema de que los algoritmos de cálculos utilizado en el flujo de trabajo no están disponibles, existen limitaciones en la posibilidad de influir en los resultados modificando parámetros de calidad del software y la documentación de los resultados es superficial (29, 30).

A modo de resumen, los pasos básicos seguidos en Agisoft (Figura 3) para la generación de los diferentes productos fotogramétricos han sido:

1. Importar las imágenes en Agisoft Photoscan junto con los datos IMU referentes a la posición (longitud, latitud y altura) para una orientación preliminar de las fotografías.
2. Proceso de orientación relativa de las imágenes, denominado en este software como alineación de imágenes (Align). Se realiza en tres fases (31), una primera fase de detección de elementos característicos (keypoints) en cada imagen; la segunda, en la que se realiza la correspondencia de los keypoints y eliminación de correspondencias inconsistentes y la tercera, en la que se realiza simultáneamente la reconstrucción tridimensional de la escena y la resolución de la posición de las cámaras en el espacio y los parámetros de calibración, mediante el uso de algoritmos de ajuste de haces, obteniéndose finalmente una nube de puntos dispersa.
3. Importación de las coordenadas de los PA, identificación, medición y definición del sistema de referencia.
4. Optimización del modelo con los parámetros de calibración de la cámara y la geometría de la nube de puntos. El procedimiento de optimización incluirá la reducción de puntos de enlace adquiridos durante el apartado 2, mejora de los parámetros de orientación interna y externa, compensación de los posibles errores originados por efecto rolling shutter (30). Los procesos de reducción de los errores en los puntos de enlace representan los residuos de las coordenadas imagen, y será necesario proceder a la limpieza utilizando la herramienta de selección gradual

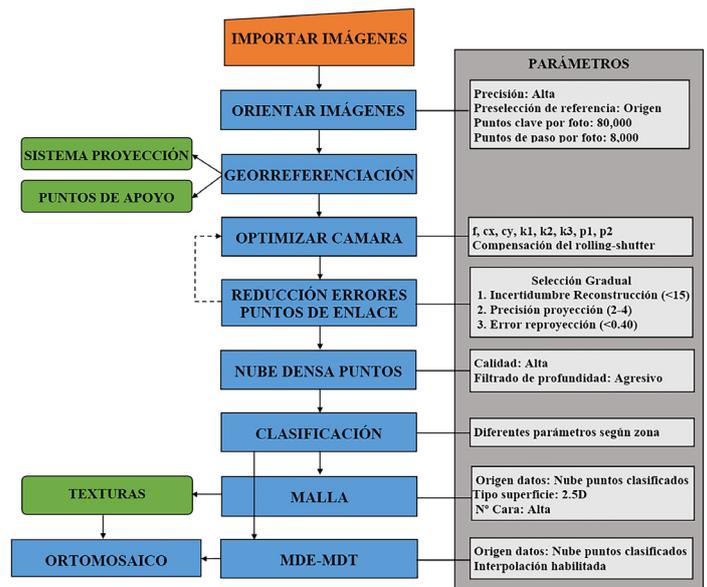


Figura 3. Flujo de trabajo en Agisoft Metashape.

habilitada en el programa, seleccionando los puntos en base a tres criterios: incertidumbre en la reconstrucción, precisión de la proyección y el error de reproyección. Estos parámetros se han abordado en diferentes publicaciones (30, 32, 33) y aplicados a las diferentes nubes de puntos obtenidas en cada tramo.

5. La creación de la nube de puntos densa se consigue mediante la aplicación de algoritmos MVS de correspondencia de imágenes.
6. Creación de los MDE a partir de la malla de polígonos.
7. Generación ortomosaico.

### 4. RESULTADOS

Realizado el ajuste y optimización de cada uno de los tramos, se procedió a la unión de todos ellos en un solo modelo. Como resultado de la fusión, se obtuvo un único bloque constituido por un total de fotografías 1435 y 224 PA, resultando un ajuste final del bloque cuyo error medio cuadrático fue de 0,028 m.

En la Tabla 1 se presenta cuadro resumen con algunos de los resultados finales obtenidos durante el ajuste del bloque de cada tramo: Se muestran por cada tramo los errores medios cuadráticos finales del ajuste en X, Y, Z ( $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$ ), el espacial ( $S_{xyz}$ ), el número de PA, las fotografías, la altura media de vuelo y el GSD medio obtenido.

Formado el bloque definitivo se procedió a la generación de la nube de puntos densa con la finalidad de eliminar puntos con ruido, se sometió a la nube densa a un primer filtrado manual, eliminando los puntos situados por debajo y muy por encima del terreno. Anulado este ruido, se procedió a la clasificación de la nube de puntos con el objeto de obtener sucesivos productos fotogramétricos. Agisoft implementa dentro del software una aplicación nativa que permite la clasificación de puntos con el objetivo de detectar los puntos de suelo, ruido bajo (34-36).

La zona de trabajo presenta estructuras de vegetación heterogeneas, con zonas de labor con siembra en diferentes estados de crecimiento, vegetación media y baja especialmente

**Tabla 1.** Resultados del procesamiento y ajuste de cada tramo.

Tramo	RMSE <sub>x</sub> (m)	RMSE <sub>y</sub> (m)	RMSE <sub>z</sub> (m)	RMSE <sub>xyz</sub> (m)	PA	Fotografías	H. media (m)	GSD Medio (cm)
1	0,013	0,012	0,017	0,024	24	179	81,7	2,1
2	0,011	0,013	0,016	0,023	34	203	81,0	2,1
3	0,019	0,016	0,013	0,028	48	426	86,5	2,2
4	0,017	0,016	0,011	0,026	27	212	85,0	2,2
5	0,012	0,009	0,005	0,016	18	73	88,7	2,1
6	0,019	0,018	0,016	0,030	17	76	82,3	2,1
7	0,014	0,019	0,013	0,027	25	90	82,4	2,1
8	0,013	0,015	0,019	0,027	28	102	84,4	2,2
9	0,014	0,017	0,015	0,026	16	74	86,0	2,2

en zonas de arroyos y desagües, monte bajo, árboles aislados, etc. En este tipo de escenario es bastante difícil realizar una óptima clasificación para generar el modelo digital del terreno; por ello, esta herramienta permite clasificar parte de la vegetación de la zona de trabajo (35, 36). Con el fin de lograr resultados más satisfactorios la configuración de esta herramienta se optimizó para valores (ángulo máximo 15°, distancia máxima 0.05m y tamaño celda 10m) con el fin de alcanzar de forma visual los mejores resultados, tratando de eliminar la vegetación.

Realizada la clasificación, se utilizaron únicamente los puntos definidos como terreno, resultando una nueva nube con una densidad de 26 puntos por metro cuadrado, es decir, el espaciado medio de los puntos fue de 0,19 m. Con esta nube se generó la triangulación, el modelo digital de elevaciones y la obtención de la ortofoto final a una resolución de 3 cm.

A partir de la nube de puntos generada, se construyó el MDE, que será el modelo topográfico base UAS sobre el que realizaremos las sucesivas comparativas en este trabajo. Para crear este MDE, partimos de un tamaño de espaciado de malla en X e Y de 1 metro de resolución (37).

Sobre la base de este modelo se crearán otros cinco con idéntica resolución y diferentes características. Estos cinco casos servirán de base comparativa junto con el documento MTC.

Se han tenido en cuenta las siguientes pautas en la definición de cada uno de los casos:

Caso 1: MDE generado únicamente con los datos base procedente de los datos UAS y con resolución de 1 metro.

Caso 2: MDE idéntico al anterior, añadiéndole líneas de roturas definidas en campo por topografía (MTC), incorporando a estas líneas la componente altimétrica del modelo digital de elevaciones base.

Caso 3: MDE idéntico al primero, incorporando las líneas de roturas definidas en campo por topografía (MTC), incluyendo la componente altimétrica tomada con topografía GNSS.

Caso 4: este caso es similar al segundo, pero eliminando todos aquellos puntos de elevaciones intermedios entre las líneas de roturas.

Caso 5: similar al caso 3, pero eliminando también los puntos intermedios del MDE entre las líneas de roturas.

Con este propósito, se decidió realizar una primera comparativa entre perfiles longitudinales del terreno. Se definió el eje de la traza diseñada para el proyecto sobre cada uno de los casos propuestos y el MTC. Definido el eje, se generaron los perfiles longitudinales del terreno con intervalos de 20 metros, extrayendo las cotas de la triangulación obtenida a partir de la nube de puntos en cada modelo. Con estas cotas se obtuvieron las diferencias entre el modelo base MTC y cada caso propuesto. En la tabla 2 se muestra a modo de resumen una porción de los resultados de esta primera comparativa.

**Tabla 2.** Tabla resumen de muestra comparativa entre perfiles longitudinales del terreno del eje.

PK	MTC Z(m)	Caso 1 Z(m)	Dif. (cm)	Caso 2 Z(m)	Dif. (cm)	Caso 3 Z(m)	Dif. (cm)	Caso 4 Z(m)	Dif. (cm)	Caso 5 Z(m)	Dif. (cm)
0+000	599,94	599,96	2	599,94	0	599,94	0	599,95	1	599,94	0
0+020	598,16	598,32	16	598,32	16	598,32	16	598,32	16	598,32	16
0+040	598,06	598,17	11	598,17	11	598,17	11	598,17	11	598,17	11
0+060	597,73	598,03	30	598,08	35	598,08	35	597,97	25	597,73	0
0+080	598,19	597,95	-24	597,95	-24	597,95	-24	597,95	-24	597,95	-24
0+100	598,42	598,44	2	598,44	2	598,44	2	598,44	2	598,44	2
0+120	600,38	600,64	26	600,64	26	600,64	26	600,64	26	600,64	26
0+140	602,56	602,93	37	602,93	37	602,93	37	602,93	37	602,93	37
0+160	604,87	604,98	11	604,98	11	604,98	11	604,98	11	604,98	11
0+180	606,44	606,53	9	606,54	10	606,54	10	606,54	10	606,54	10
0+200	608,93	608,83	-11	608,83	-11	608,83	-11	608,83	-11	608,83	-11

A fin de sintetizar los resultados obtenidos en esta primera prueba se muestran en las siguientes tablas (Tabla 3a y 3b) un resumen con el porcentaje de cotas de los PK que cumplen el criterio de precisión de la escala de trabajo y cuyos errores son inferiores a un determinado intervalo. Los límites de error altimétrico para cada escala de trabajo, se han adoptado de acuerdo a los criterios establecidos en el test posicional cartográfico de la American Society for Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (ASPRS, 2015)(38).

Analizando estos datos los peores resultados se obtienen para los casos 1, 2 y 3, donde el 47% de los puntos presentan unos errores inferiores a 10 cm, y que entre el 77% y el 78% de los puntos, estarían dentro de los límites establecidos para trabajar a escala 1:1000. Sin embargo, los dos casos restantes presentan valores estadísticos superiores. Así, por ejemplo, para el tramo inferior a 10 cm, el número total de errores de los puntos varía entre el 58% y 60 %, y para la escala de trabajo 1:1000, se observa un alto porcentaje de puntos, 82-83%, que cumplen los límites de errores altimétricos.

Únicamente en los tres primeros casos se alcanza un alto porcentaje de puntos (91-97%) que cumplen los criterios de error límite para las escalas de trabajo comprendidas entre 1:1500 y 1:2000, cuyos errores estarían dentro del tramo inferior a los 25 cm. En los casos 4 y 5, el porcentaje de errores en los puntos se alcanza en el tramo de los 20 cm.

Deducimos, que prácticamente no existen diferencias entre los tres primeros casos analizados. Sin embargo, el cuarto y quinto caso presentan una mejoría sustancial en los resultados obtenidos. Así, la inclusión de las líneas de roturas en la nube de puntos para la construcción de la triangulación y posterior generación del modelo digital del terreno, mejora significativamente los modelos.

**Tabla 3a.** Porcentaje de puntos en función de la escala de trabajo.

Escala	Caso_1	Caso_2	Caso_3	Caso_4	Caso_5
1:500	41%	40%	41%	50%	52%
1:1000	77%	77%	78%	82%	83%
1:1500	91%	91%	91%	94%	95%
1:2000	97%	97%	97%	98%	98%

**Tabla 3b.** Porcentaje de puntos en función de intervalos de error.

Intervalo Error	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
<10cm	47%	47%	47%	58%	60%
<15cm	69%	68%	69%	76%	78%
<20cm	83%	83%	83%	90%	91%
<25cm	92%	93%	93%	94%	95%

Evaluados los errores se procedió a realizar análisis visual de ubicación de los mayores sobre la ortofoto, observando diferentes situaciones. En algunos de casos, los puntos que definían la cota del perfil del terreno estaban situados sobre

cauces de arroyos, canales, desagües, cabezas y pies de taludes, próximos a paredes de piedras, siembras etc, tal y como se muestran en la figura 4 y 5.

Como se ilustra a modo de ejemplo en la figura 5, en estas ubicaciones se concentra gran cantidad de vegetación, debido principalmente a la humedad existente, presentando superficies muy densas y con falta de homogeneidad. Estas zonas de vegetación son difíciles de eliminar con los algoritmos de filtrados que existen en la actualidad, por tanto, es recomendable suprimir este ruido por medio de técnicas de segmentación manual, mediante la incorporación de líneas que roturas tomadas en campo.

Continuando con el análisis del perfil longitudinal del terreno, nos encontramos con otros puntos ubicados sobre el suelo desnudo, sin ningún tipo de vegetación y que presentan diferencias altimétricas, cuyos valores pueden estar entre los 6 y 20 cm. Algunos de estos errores pueden deberse a que cuando se tomaron los datos topográficos era el mes de diciembre y había llovido, el terreno era de labor con siembra y por ello, susceptible de que al realizar la toma de datos y apoyar el jalón del GNSS móvil sobre el terreno, pudiera hundirse algunos centímetros e introducir errores, que sin embargo no deberían superar valores de entre 6 a 10 cm, incluídos dentro de estos el propio error inherente al sistema GNSS, sobre 3 cm en altimetría.

Los valores anteriormente mencionados y algunos otros, hacen que nos replanteemos nuestra hipótesis de partida, en la cual considerábamos el levantamiento topográfico MTC como base para establecer el modelo de referencia sobre el que realizar la comparativa.

Llegados a este punto, se analizó detalladamente el MTC, haciéndose en primer lugar un muestreo de los puntos tomados en campo, observando que la espaciado medio entre puntos era de aproximadamente 10-12 metros para aquellas zonas en las que se definía la morfología del terreno por medio de las líneas de rotura como, por ejemplo, pie y cabeza de talud en carretera, caminos, arroyos, paredes de contención, fondo de canales y desagües, etc. Para el resto de la superficie de relleno que no representan características especiales del terreno, el espaciado medio de puntos fue de entre 25 y 40 metros. Con esta densidad, la construcción de la triangulación que ha servido de base para nuestro MDT y sobre el que hemos extraído por interpolación la cota de cada uno de los puntos que definen el perfil longitudinal del terreno, denota que el modelo obtenido por topografía clásica presenta dichas diferencias altimétricas, debido a la interpolación, con respecto a la malla de puntos obtenidos con UAS y cuyo espaciado medio fue de aproximadamente 1 metro.

Por lo expuesto, podemos concluir que los modelos densos obtenidos con el avión no tripulado, son más precisos que el modelo obtenido con topografía clásica.

Con el fin de contrastar la conclusión anterior, procedimos a replantear en campo una porción del eje de la carretera, en concreto del PK 0+000 al 2+500, y medir las cotas sobre el terreno a intervalos de 20 metros mediante un equipo GNSS. Estos datos obtenidos directamente en campo, se confrontaron con los derivados del MTC y con cada uno de los generados con el vehículo aéreo no tripulado.



Figura 4: a) Punto del perfil longitudinal del terreno sobre arroyo en el PK 0+060. b) Punto del perfil longitudinal del terreno sobre canal desagüe situado en el PK 4+800 y c) Cota perfil longitudinal del terreno sobre canal junto a pared de piedra en PK 4+300.



Figura 5. Detalle de ruido altimétrico introducido por la vegetación en arroyos, canales y desagües.

Con estos datos obtuvimos dos nuevas tablas (Tabla 4a y 4b), en las que se muestran un resumen del porcentaje de cotas del eje del terreno replanteado, que cumplen el criterio de precisión a la escala de trabajo y con errores inferiores a un determinado intervalo.

Se observa en esta comparativa (Tabla 4a), con datos obtenidos de la superficie real del terreno, que el 90% de los puntos para los casos 4 y 5, están dentro de la tolerancia establecida para la escala de trabajo 1:500, es decir, errores inferiores a 8 cm. Para la escala de trabajo 1:1000, todos los casos tienen un elevado porcentaje de puntos que cumplen los requisitos de escala, pero especialmente los dos últimos casos con valores entre el 98% y el 99%, indicando que prácticamente todos los puntos cumplen la tolerancia de la escala indicada. De estos resultados se observa una disminución en la precisión del modelo topográfico MTC con respecto a los casos 4 y 5, pero ligeramente superior al del resto de casos. Los porcentajes de error tienden a igualarse en todos los casos a partir de la escala 1:1000, donde los errores no superan los 17 cm.

En la tabla 4b puede observarse que para los casos 4 y 5 existe un alto porcentaje de puntos del 62% cuyos errores no superan los 5 cm; sin embargo, los casos 1, 2 y 3 presentan resultados inferiores que no superan el 32% y el 46% para el MTC.

Tabla 4a. Porcentaje de puntos en función de la escala de trabajo en la comparativa de replanteo.

Escala	MTC	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
1:500	66%	60%	59%	59%	90%	90%
1:1000	93%	97%	97%	97%	98%	99%
1:1500	98%	98%	98%	98%	98%	99%
1:2000	99%	98%	98%	98%	100%	100%

Tabla 4b. Porcentaje de puntos en función de intervalos de error en la comparativa de replanteo.

Escala	MTC	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
<5cm	46%	32%	31%	31%	62%	62%
<7.5cm	60%	50%	48%	50%	84%	83%
<10cm	73%	83%	83%	82%	96%	96%
<12.5cm	82%	95%	95%	94%	97%	98%

Entre el intervalo de error comprendido entre los 10-12.5 cm, se encuentran prácticamente la totalidad de los puntos de los casos 4 y 5, observando un mejor comportamiento para los casos 1, 2 y 3 en detrimento del MTC.

## 5. DISCUSIÓN

Con estos datos podemos ratificar las conclusiones que se expusieron con anterioridad, y es que los modelos obtenidos a partir de los datos generados con UAS presentan mejores precisiones que los adquiridos por topografía clásica, especialmente si intervienen en el cálculo las líneas de roturas y se eliminan los puntos intermedios entre ellas, quedando la superficie únicamente definida por estos elementos lineales.

Como se manifestó anteriormente las líneas de rotura mejoran las precisiones de los MDT, por ello, fueron utilizadas las tomadas en campo con topografía clásica; mientras que en los casos 2 y 4, únicamente se asignó la componente altimétrica del modelo denso de puntos a la parte planimétrica.

Hay que incidir en este apartado sobre las líneas de rotura e indicar que, aunque pueda especularse y definirse a partir de la ortofoto generada y extraer la altimetría del modelo (Casos 2 y 4), en general la correcta definición de los elementos geométricos que delimitan las líneas de rotura, únicamente se puede conseguir mediante la toma de datos directas en el campo, ya que como se expuso anteriormente, muchos objetos que necesitamos definir están cubiertos con vegetación.

A modo de ejemplo, para el caso de un arroyo se necesitaría tomar en campo los datos topográficos que definen correctamente la sección del mismo. En la figura 6, se muestra una sección longitudinal de un arroyo que atraviesa el eje proyectado de la carretera. Puede apreciarse en la imagen inferior la errónea definición de la sección elaborada utilizando la nube de puntos densa y en color verde se muestra la definición correcta obtenida por la toma topográfica realizada en el campo.



Figura 6. Detalle perfil definición de sección de arroyo.

Como se indicó previamente, en aquellas zonas en las que la vegetación altere las características del terreno es necesario definir correctamente la geometría mediante la realización de trabajos de campo con topografía clásica.

No obstante, existen superficies del terreno en las que no existe vegetación y es necesario definir su geometría por medio de líneas características, con la finalidad de obtener un modelo que sea una fiel representación del terreno. Así, por ejemplo, en una carretera sobre las zonas de las cabezas y pies de los taludes suele haber vegetación, por tanto, sería apropiado realizar la toma de datos en campo de estos elementos. Pero sobre el eje y el borde de la carretera, no suele haber vegetación, por consiguiente, podemos pensar a priori que puede tomarse directamente aquellos que definen la geometría a partir de la ortofoto generada y extraer la altimetría del modelo digital.

El uso de algoritmos SfM y MVS introducen numerosos ruidos sobre las superficies de estudio es especialmente cuando no son homogéneas y presentan bajos contrastes (18, 19, 39, 40), así en una carretera, la superficie es totalmente uniforme en cuanto a color y por ello extremadamente homogénea.

Para comprobar lo anteriormente indicado, se han definido tres ejes sobre las tres vías principales que atraviesa la traza del proyecto, las carreteras N-432, EX-103 y EX-200, cada uno de ellos con una longitud de 425, 320 y 195 metros. A partir de estos ejes se generaron los perfiles longitudinales cada 5 metros, tanto para el MTC como para el caso 2, con el objetivo de obtener una comparativa de resultados.

A modo de resumen, en la tabla 5 se muestra parte de los resultados obtenidos. Se observa las diferencias existentes entre las cotas del MTC y el caso-2, especialmente los cambios en la dirección de las magnitudes, que hacen que las definiciones de la sección longitudinal sobre cada carretera presenten numerosos picos, dando lugar a un perfil longitudinal con numerosos dientes de sierra, debido al elevado ruido introducido por la nube de puntos obtenida sobre este tipo de superficies.

En la figura 7 se muestra un pequeño fragmento de la carretera N-432, sobre la que se ha definido, a modo de ejemplo, sobre la nube de puntos obtenida con UAS una sección longitudinal (A-B) de 135m sobre el eje de la carretera y tres perfiles transversales denominados T-1, T-2 y T-3 de aproximadamente 30 m cada uno de ellos. Puede observarse lo indicado anteriormente, tanto en el perfil longitudinal de la carretera como sobre cada uno de los transversales definidos.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la combinación de técnicas fotogramétricas utilizadas para realizar capturas masivas de puntos, a partir de imágenes obtenidas desde UAS, generan diversos productos fotogramétricos (ortofoto, nube de puntos, MDE, MDT, etc.), que pueden ser utilizados como documento topográfico base en la redacción y ejecución de cualquier proyecto de ingeniería civil.

La incorporación de estas metodologías de trabajo permiten obtener ortomosaicos de la zona de trabajo a una altísima resolución, convirtiéndose en un valioso documento en cualquier proyecto de ingeniería, ya que permiten la medición de

**Tabla 5.** Fragmento de tablas de resultados de perfiles longitudinales en N-432, EX-103 y EX-200.

PK	N-432			EX-103			EX-200		
	MTC	Caso-2	Dif.(cm)	MTC	Caso-2	Dif.(cm)	MTC	Caso-2	Dif.(cm)
0+000	608,83	608,68	15	601,64	601,65	-1	646,88	646,86	2
0+005	608,77	608,69	7	601,59	601,66	-8	646,99	646,97	2
0+010	608,7	608,58	12	601,54	601,61	-7	647,11	647,12	-1
0+015	608,63	608,52	11	601,49	601,54	-5	647,23	647,27	-4
0+020	608,57	608,58	-1	601,44	601,49	-6	647,34	647,4	-6
0+025	608,5	608,41	9	601,39	601,42	-3	647,46	647,47	-1
0+030	608,44	608,36	8	601,34	601,39	-4	647,57	647,64	-7
0+035	608,37	608,4	-3	601,3	601,31	-2	647,70	647,7	0
0+040	608,31	608,25	5	601,25	601,28	-3	647,82	647,86	-3
0+045	608,24	608,20	4	601,2	601,22	-1	647,95	647,97	-2
0+050	608,18	608,15	3	601,16	601,16	0	648,07	648,09	-2
0+055	608,11	608,06	5	601,11	601,13	-2	648,20	648,24	-4
0+060	608,05	608,04	1	601,07	601,07	0	648,32	648,42	-9
0+065	607,98	607,97	1	601,02	601,00	2	648,45	648,49	-4
0+070	607,92	607,95	-4	600,97	600,95	3	648,58	648,6	-2
0+075	607,85	607,84	1	600,92	600,91	1	648,72	648,7	2
0+080	607,78	607,77	1	600,86	600,88	-1	648,85	648,89	-3
0+085	607,72	607,71	1	600,81	600,82	-2	648,99	649,02	-4
0+090	607,65	607,64	1	600,75	600,79	-4	649,12	649,16	-4
0+095	607,59	607,58	1	600,7	600,75	-6	649,26	649,29	-3
0+100	607,52	607,51	1	600,64	600,69	-4	649,41	649,41	0

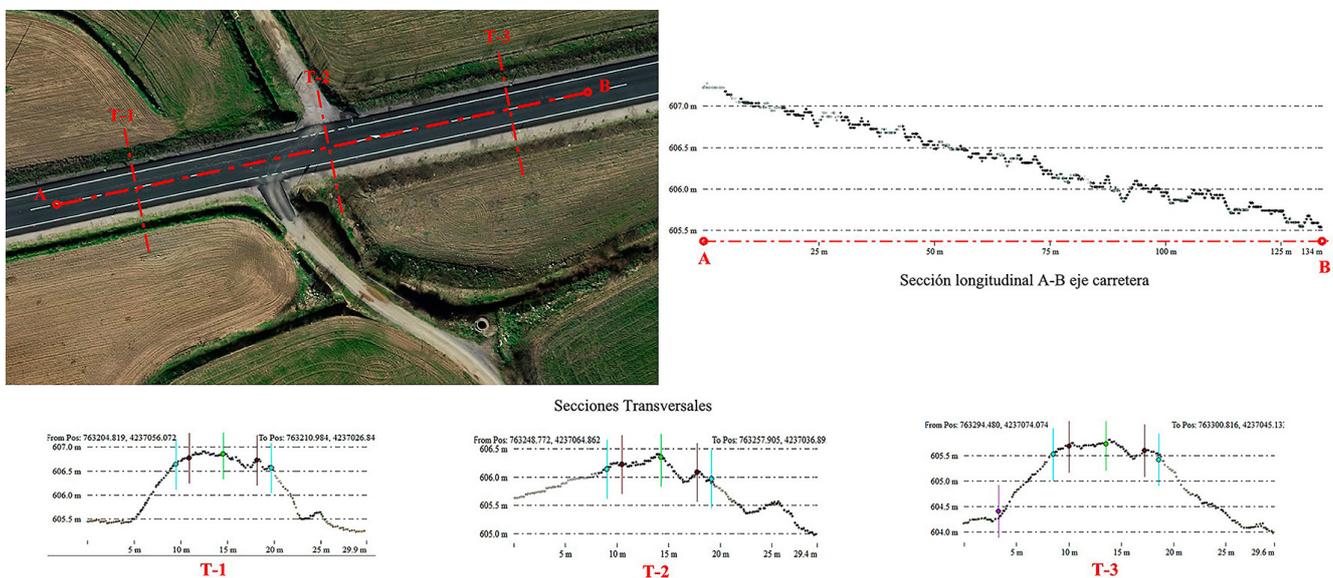


Figura 7. Detalle de sección longitudinal y varios transversales de porción de la carretera N-432.

coordenadas planimétricas con una gran precisión, la realización directa de medidas de distancias entre cualquier objeto reflejado en ella con un alto nivel de detalle, identificación y localización de objetos a una mayor escala, exploración de elementos que pueden permanecer ocultos a simple vista en el terreno o sobre un modelo topográfico obtenido por topografía clásica, etc.

No obstante, es conveniente recordar que la precisión planimétrica en una ortofoto disminuye al definir erróneamente la elevación en el modelo digital, que servirá de base para la reproyección y obtención de la ortofoto. Por ello, es apropiado realizar una adecuada elección de las componentes altimétricas, que serán las que definan el modelo y a posteriori la ortoimagen y su calidad geométrica.

Tal y como hemos expuesto a lo largo de este trabajo, es en la componente altimétrica donde nos encontraremos con los mayores errores en la construcción de un modelo digital del terreno a partir de los datos extraídos de las imágenes con UAS. Es por ello, que para las nubes de puntos densas resultantes del procesamiento, será necesario una adecuada interpretación, tratamiento y depuración, con el objetivo de eliminar todo aquel ruido que distorsione la correcta representación de la superficie del terreno y mejorar la fiabilidad de los datos para lograr su correcta modelización tridimensional.

Podemos también afirmar, que para la construcción del modelo digital no es necesario utilizar el total de puntos de la nube densa, bastaría con utilizar una resolución media entre puntos de un metro. Con una reducción de aproximadamente 40 veces (en nuestro caso) en el número de puntos que intervegan en la generación del modelo digital del terreno, se ahorran enormes recursos de software y hardware en cuanto a visualización y computo de datos.

En esta investigación se ha puesto de manifiesto que, tras un primer proceso de filtrado de la nube de puntos, sigue habiendo numerosos puntos con ruido, especialmente en aquellas zonas con vegetación densa y uniforme, que hacen que la definición de la superficie tridimensional del terreno sea

errónea. Si a estos modelos de puntos previamente filtrados, se les incorporaran las líneas de roturas mejoran considerablemente los resultados alcanzados.

Tras los resultados emanados de las diferentes pruebas realizadas, consideramos idóneo para la modelización tridimensional del terreno, la combinación de las metodologías de trabajo que permiten realizar captura masiva de puntos a partir de imágenes obtenidas con UAS con las medidas de datos topográficas tradicionales (líneas de roturas o características), las cuales proporcionan una adecuada definición geométrica de aquellos elementos característicos del terreno. Al utilizar esta composición de datos conseguiremos obtener una correcta definición del terreno y un ahorro de trabajo y por tanto en los costes. Al combinar ambas técnicas, la toma topográfica en campo se reduciría bastante ya que únicamente consistiría en realizar la toma de las líneas características del terreno y los puntos de apoyo. El resto de la red, comúnmente denominada en topografía relleno, quedaría perfectamente definida por los puntos obtenidos del vuelo.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del convenio (Ref 001/20) entre la Universidad de Extremadura y la empresa CIEX, siendo esta última la entidad financiadora.

## 8. REFERENCIAS

- (1) Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1): 1-15. <https://dx.doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>.
- (2) Trujillo, M.M., Darrah, M., Speransky, K., DeRoos, B., Wathen, M. (2016). Optimized flight path for 3D mapping of an area with structures using a multicopter. *In 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 7-10: 905-910. Arlington (USA): IEEE. <https://dx.doi.org/10.1109/ICUAS.2016.7502538>.
- (3) Chaudhry, M.H., Ahmad, A., Gulzar, Q. (2020). A comparative study of modern UAV platform for topographic mapping. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 540(1): 012019. IOP Publishing. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012019>.
- (4) Kraaijenbrink, P.D.A., Shea, J.M., Pellicciotti, F., Jong, S.M. de Immerzeel, W.W. (2016). Object-based analysis of unmanned aerial vehicle imagery to map and characterise surface features on a debris-covered glacier. *Remote Sensing of Environment*, 186: 581-595. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.013>.
- (5) Rossini, M., Di Mauro, B., Garzonio, R., Baccolo, G., Cavallini, G., Mattavelli, M., Colombo, R. (2018). Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry. *Geomorphology*, 304: 159-172. <https://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.039>.
- (6) Chang, K.J., Tseng, C.W., Tseng, C.M., Liao, T.C., Yang, C.J. (2020). Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Acquired Topography for Quantifying Typhoon-Driven Landslide Volume and Its Potential Topographic Impact on Rivers in Mountainous Catchments. *Applied Sciences*, 10(17):6102. <https://doi.org/10.3390/app10176102>.
- (7) Yuan, X., Qiao, G., Li, Y., Li, H., Xu, R. (2020). Modelling of Glacier and Ice Sheet Micro-Topography Based on Unmanned Aerial Vehicle Data, Antarctica. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43: 919-923. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-919-2020>.
- (8) Cunliffe, A.M., Tanski, G., Radosavljevic, B., Palmer, W.F., Sachs, T., Lantuit, H., Myers-Smith, I.H. (2019). Rapid retreat of permafrost coastline observed with aerial drone photogrammetry. *The Cryosphere*, 13: 1513-1528. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1513-2019>.
- (9) Turner, I.L., Harley, M.D., Drummond, C.D. (2016). UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, 114: 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.03.011>.
- (10) Gonçalves, G.R., Pérez, J. A., Duarte, J. (2018). Accuracy and effectiveness of low cost UASs and open source photogrammetric software for foredunes mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16): 5059-5077. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1446568>.
- (11) Tatum, M. C., Liu, J. (2017). Unmanned aircraft system applications in construction. *Procedia Engineering*, 196: 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.187>.
- (12) Coetzee, G. L. (2018). Smart Construction Monitoring of Dams with UAVS-Neckartal dam Water Project Phase 1. Smart Dams and Reservoirs: *Proceedings of the 20th Biennial Conference of the British Dam*, 13-15:445-456. Swansea (ICE Publishing). <https://doi.org/10.1680/sdar.64119.445>.
- (13) Sreenath, S., Malik, H., Husnu, N., Kalaichelavan, K. (2020). Assessment and Use of Unmanned Aerial Vehicle for Civil Structural Health Monitoring. *Procedia Computer Science*, 170: 656-663. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.174>.

- (14) Colomina, I., Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92: 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
- (15) Kardasz, P., Doskocz, J., Hejduk, M., Wiejkut, P., Zarzycki, H. (2016). Drones and possibilities of their using. *Journal of Civil Environmental Engineering*, 6(3): 1-7. <https://dx.doi.org/10.4172/2165-784X.1000233>.
- (16) Kerle, N., Nex, F., Gerke, M., Duarte, D., Vetrivel, A. (2020). UAV-Based Structural Damage Mapping: A Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(1): 14. <https://doi.org/10.3390/ijgi9010014>.
- (17) Pena-Villasenin, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2020). Desktop vs cloud computing software for 3D measurement of building façades: The monastery of San Martín Pinario. *Measurement*, 149: 106984. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106984>.
- (18) Rangel, J.M.G., Gonçalves, G.R., Pérez, J.A. (2018). The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. *International Journal of Remote Sensing*, 39(21): 7154-7171. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1515508>.
- (19) Pérez, J.A., Gonçalves, G.R., Rangel, J.M.G., Ortega, P.F. (2019). Accuracy and effectiveness of orthophotos obtained from low cost UASs video imagery for traffic accident scenes documentation. *Advances in Engineering Software*, 132: 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.03.010>.
- (20) Hugenholtz, C., Brown, O., Walker, J., Barchyn, T., Nesbit, P., Kucharczyk, M., Myshak, S. (2016). Spatial accuracy of UAV-derived orthoimagery and topography: Comparing photogrammetric models processed with direct geo-referencing and ground control points. *Geomatica*, 70(1): 21-30. <https://doi.org/10.5623/cig2016-102>.
- (21) Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. (2017). Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*, 143(2): 04016025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206).
- (22) Popescu, G., Iordan, D., Păunescu, V. (2016). The resultant positional accuracy for the orthophotos obtained with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 10: 458-464. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.09.016>.
- (23) Pérez, Juan Antonio, Gil Rito Gonçalves, and María Cristina Charro. (2019). On the positional accuracy and maximum allowable scale of UAV-derived photogrammetric products for archaeological site documentation. *Geocarto International*, 34(6): 575-585. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1421714>.
- (24) Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points. *Remote Sensing*, 12(15): 2447. <https://doi.org/10.3390/rs12152447>.
- (25) Ackermann, F. (1966). On the theoretical accuracy of planimetric block triangulation. *Photogrammetria*, 21(5): 145-170. [https://doi.org/10.1016/0031-8663\(66\)90009-3](https://doi.org/10.1016/0031-8663(66)90009-3).
- (26) Smith, M.W., Carrivick, J.L., Quincey, D.J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40(2): 247-275. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>.
- (27) Pikelj, K., Ružić, I., James, M. R., Ilic, S. (2018). Structure-from-Motion (SfM) monitoring of nourished gravel beaches in Croatia. In *Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2017: Realising the Potential* (pp. 561-564). ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/cmsb.63174.0561>.
- (28) Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., Rosette, J. (2019). Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. *Current Forestry Reports*, 5(3): 155-168. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>.
- (29) James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280: 51-66. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>.
- (30) Mayer, C., Pereira, L. G., Kersten, T. P. (2018). A comprehensive workflow to process UAV images for the efficient production of accurate Geo-Information. In *IX National Conference on Cartography and Geodesy*. Amadora (CNCG2018).
- (31) Gindraux, S., Boesch, R., Farinotti, D. (2017). Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on glaciers. *Remote Sensing*, 9(2): 186. <https://doi.org/10.3390/rs9020186>.
- (32) USGS (2017). Unmanned Aircraft Systems Data Post-Processing. United States Geological Survey. UAS Federal Users Workshop 2017. <https://uas.usgs.gov/nupo/pdf/PhotoScanProcessingDSLRLMar2017.pdf>.
- (33) James, M. R. (2017). SfM-MVS PhotoScan image processing exercise. IAVCEI 2017 UAS workshop: Lancaster University. James, Mike. (2017). SfM-MVS PhotoScan image processing exercise. [https://www.researchgate.net/publication/320407992\\_SfM-MVS\\_PhotoScan\\_image\\_processing\\_exercise](https://www.researchgate.net/publication/320407992_SfM-MVS_PhotoScan_image_processing_exercise).
- (34) Agisoft, L. L. C. (2018). Agisoft metashape user manual, Professional edition, Version 1.5. Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia. [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_6\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf).
- (35) Nadal-Romero, E., Revuelto, J., Errea, P., López-Moreno, J.I. (2015). The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands area (central Spanish Pyrenees). *Soil*, 1(2):561. <https://doi.org/10.5194/soil-1-561-2015>.
- (36) Anders, N., Valente, J., Masselink, R., Keesstra, S. (2019). Comparing Filtering Techniques for Removing Vegetation from UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. *Drones*, 3(3): 61. <https://doi.org/10.3390/drones3030061>.
- (37) Montilla Galván, J. (2020). Tratamiento y Depurado de Nubes de Puntos obtenidas mediante Fotogrametría Aérea (UAV/drones) aplicadas a Ingeniería Civil. Algoritmos de Filtrado y Geometrías Convergentes (TFM no publicado), Cáceres, Universidad de Extremadura.
- (38) American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). (2015). New ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data released. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 81(4): 227-253. [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/PERS\\_March2015\\_Highlight.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/PERS_March2015_Highlight.pdf).

- (39) Brunier, G., Fleury, J., Anthony, E. J., Gardel, A., Dussouillez, P. (2016). Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology*, 261: 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.025>.
- (40) Kraaijenbrink, P.D.A., Shea, J.M., Pellicciotti, F., de Jong, S.M., Immerzeel, W.W. (2016). Object-based analysis of unmanned aerial vehicle imagery to map and characterise surface features on a debris-covered glacier. *Remote Sensing of Environment*, 186: 581-595. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.013>.