

## GRAPHIC DOCUMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL HERITAGE USING LIDAR ON UAV. EXPERIMENTAL ANALYSIS OF OPTIMAL FLIGHT PARAMETERS

### *DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DEL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO MEDIANTE LIDAR SOBRE UAV. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS OPTIMOS DE VUELO*

Jesús Rodríguez-Bulnes <sup>a1</sup>, José Antonio Benavides-Lopez <sup>a2</sup>, Jose María Martín Civantos<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, Universidad de Granada, España.

<sup>b</sup>Departamento de Historia Medieval y Ciencias y Técnicas Historiográficas, Universidad de Granada, España.

<sup>a1</sup>jesusitt@ugr.es, <sup>a2</sup>jbenavid@ugr.es, <sup>b</sup>Civantos@ugr.es

#### Abstract

The introduction of new technologies has opened new methodological avenues and theoretical approaches of great interest for archaeological research and the conservation of historical heritage. This study delves into the advantages of LiDAR systems in the analysis of landscapes and archaeological elements in areas with dense vegetation. The acquisition of three-dimensional graphical documentation of reality for topographic, heritage, architectural, or industrial purposes has been revolutionized in the last decade by the application of unmanned aerial vehicles (UAVs). UAVs have become a fundamental tool in the daily work of technicians, allowing the documentation of large land areas or inaccessible places with great efficiency and better results using traditional methods. UAVs, commonly known as drones, can carry various types of sensors, always conditioned by their size and weight. These limitations mainly resulted in the use of small passive sensors, such as RGB, multispectral, or infrared cameras. The evolution of the sector has enabled the availability of active remote sensing LiDAR (Light Detection and Ranging) sensors at the consumer level, opening up new possibilities that multi-image photogrammetry does not allow, such as acquiring information with reduced ambient light, in shaded areas, or under vegetation. The aim of this study is to perform a comparative analysis of the three-dimensional representation of terrain and structural elements present in densely vegetated landscapes, analysing the penetration index of the airborne LiDAR pulse recording archaeological features based on flight parameters: altitude and speed. The study also offers a series of methodological innovations based on the data extracted and the specifics of these types of sensors. At this point, we can pose the question: what is the difference between obtaining surveying for technical versus archaeological purposes? In topography, the precision of the digital model is established based on the working scale, generating a regulated surface where the final result undergoes a generalization process that smooths terrain forms to obtain contour lines that represent the terrain and are easily interpretable based on the scale. Conversely, in archaeology, evidence of anthropogenic activity is sought, requiring a higher definition of shapes, a greater number of points, and the application of specific visualization systems. For our study, we have proposed two distinct scenarios: an ideal one (without any vegetation or obstacles and horizontal topography, specifically a model airplane landing strip), and a very complex one with dense pine vegetation and steep slopes, conducting a series of flights at different altitudes (between 70 and 120 m) and various aircraft speeds (between 5 and 10 m/s). Finally, we conducted a statistical study of the results to determine the optimal parameters for the desired goals, proposing an optimal workflow and scheme.

**Keywords:** RPA; laser-3D; surveying; archaeological-detection.

## Resumen

La introducción de nuevas tecnologías ha abierto nuevas vías metodológicas y enfoques teóricos de gran interés para la investigación arqueológica y la conservación del patrimonio histórico. Este estudio profundiza en las ventajas de los sistemas LiDAR en el análisis del paisaje y elementos arqueológicos en zonas con gran vegetación. La obtención de documentación gráfica tridimensional de la realidad con fines topográficos, patrimoniales, arquitectónicos o industriales se ha visto revolucionada en la última década por la aplicación de vehículos aéreos no tripulados (UAV), convirtiéndose en una herramienta básica en el trabajo diario de los técnicos, permitiendo documentar grandes superficies de terreno o lugares inaccesibles con una gran eficiencia y con mejores resultados si cabe que con los métodos clásicos. Los UAV, comúnmente conocidos como drones permiten aerotransportar distintos tipos de sensores, siempre condicionados por su dimensión y peso. Estas limitaciones hacían que principalmente se utilizarán sensores pasivos de reducido tamaño: es decir cámaras RGB, multiespectrales o infrarrojos. La constante evolución del sector ha permitido que los sensores activos de teledetección LiDAR (*Light Detection and Ranging*) estén disponibles a nivel consumidor abriendo nuevas posibilidades que la fotogrametría multi-imagen no permite, como la adquisición de información con reducida luz ambiental, zonas sombreadas o la adquisición de datos bajo la vegetación. El objetivo de este estudio es realizar un análisis comparado de la representación tridimensional del terreno y de los elementos estructurales presentes en paisajes con densa vegetación, analizando en base a los parámetros de vuelo: altura y velocidad, el índice de penetración del pulso LiDAR aerotransportado para el registro de las características arqueológicas. El estudio también ofrece una serie de novedades metodológicas basadas en los datos extraídos y las especificidades de este tipo de sensores. En este punto podemos plantear la pregunta ¿qué diferencia existe entre la obtención de topografía con fines técnicos a arqueológicos? En topografía se establece la precisión del modelo digital en función de la escala de trabajo y se genera una superficie reglada, en la que el resultado final sufre un proceso de generalización que suaviza las formas del terreno con el fin de obtener curvas de nivel que representen el terreno y sean interpretables fácilmente en función de la escala. Por el contrario, en arqueológica se buscan indicios de actividad antrópica, por lo que se persigue una mayor definición de las formas, un mayor número de puntos, y aplicar unos sistemas de visualización específicos. Para nuestro propósito de estudio, hemos planteado dos escenarios bien distintos: uno ideal (sin ningún tipo de vegetación ni obstáculo y con topografía horizontal, en concreto una pista de aterrizaje de un campo de modelismo y por otro lado, uno muy complejo con densa vegetación de pinar y fuertes pendientes realizando una serie de vuelos de con diferente altura, (entre 70 y 120 m) y con distintas velocidades de avance de la aeronave (entre 5 y 10 m/s). Finalmente hemos realizado un estudio estadístico de los resultados que nos permitan determinarlos parámetros óptimos para los fines deseados, planteando un esquema y flujo de trabajo óptimos.

**Palabras clave:** RPA; laser-3d; topografía; detección-arqueológica.

## 1. INTRODUCTION

Over the past decade, the application of remote sensing techniques to the study of cultural landscapes and archaeological heritage has undergone significant evolution due to advancements in computing and new data acquisition technologies. The study of landscapes reflects both physical and cultural aspects, resulting from the interaction between human activities and natural processes. Understanding the topography is essential for appropriately

determining suitable locations for human activities and developments, mapping, generating 3D models, defining watersheds, mapping flood-prone areas, conducting forest inventories, predicting the spread of physical phenomena (pollution, landslides, etc.), studying ecosystems, and investigating climate change. In this context, the technology that allows for the most precise capture of elevation information is LiDAR.

The applications of LiDAR in the location and documentation of archaeological sites have been demonstrated on numerous occasions, particularly

in cases where dense vegetation covers the structures (Castilla-Agredano et al., 2021; Fernández-Lozano & Sanz-Ablanedo, 2021; Horn & Ford, 2019; Kokalj & Somrak, 2019; López et al., 2020; Pietro Brogiolo & Sarabia-Bautista, 2017; Zavod Filozofskog Fakulteta Sveučilišta Zagrebu et al., 2018).

Its development and consolidation throughout the 20th century have enabled the production of high-quality documents. In 2009, following a series of pilot tests and addressing the need of some partners of the PNOA project for more accurate digital terrain models, the PNOA-LiDAR project was initiated (<https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar>). Its objective is to capture three-dimensional information using airborne LiDAR sensors across the entire territory of Spain, generating highly useful products from this data capture (point clouds with georeferenced coordinates, Digital Terrain Models, etc.). Project cycles: (Instituto Geográfico Nacional, 2024).

As can be seen in the summary table, the highest point density is achieved with the third coverage (2022–2025), obtaining 5 points per m<sup>2</sup>, although

no data from the third coverage has yet been published.

LiDAR is a remote sensing technique that uses an active sensor based on laser light pulses. An airborne LiDAR system consists of: a vehicle that transports it, which can be a plane, helicopter, or UAV; a laser scanning system (ALS) responsible for emitting the laser light pulses; GNSS (global navigation satellite system) that records the georeferenced position and height of the system; an inertial navigation system (INS) that records the system's rotation, tilt, and heading parameters; and an RGB camera (optional) that records images to colorize the resulting point cloud and perform photogrammetric processes (Antonio Esquivel et al., 2012).

The distance between the LiDAR sensor and the object is determined by measuring the time it takes for the wave to travel from emission to return after impacting the surface. LiDAR raw data, also known as primary data, consists of a series of measurements of the time and intensities of the returned pulses (Lozić & Štular, 2021). During the registration stage, these data are correlated

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Característica	Primera cobertura	Segunda cobertura	Tercera cobertura
Densidad mínima de puntos	0.5 puntos/m <sup>2</sup>	0.5 - 2 puntos/m <sup>2</sup>	5 puntos/m <sup>2</sup>
Años de vuelo	2009 - 2015	2015 - 2021	2022 - 2025
Sistema geodésico de referencia	ETRS89 husos 28, 29, 30 y 31 según corresponda		
Sistema de referencia altimétrico	Altitudes ortométricas, geoide de referencia EGM08		
RMSE Z	≤ 40 cm	≤ 20 cm	≤ 10 cm
Precisión planimétrica estimada	≤ 30 cm	≤ 30 cm	≤ 25 cm
Imagen simultánea	No (excepción Baleares)	Sí, desde 2016	Sí
Tamaño ficheros	2 x 2 km	2 x 2 km (excepción Madrid)	1 x 1 km
Formato ficheros	LAS 1.2 format 3		LAS 1.4 format 8
Paso de malla del MDE	5 m x 5 m	2 m x 2 m	0.5 m x 0.5 m
RMSE Z (MDE)	≤ 50 cm	≤ 25 cm	≤ 15 cm
Precisión planimétrica estimada (MDE)	≤ 50 cm	≤ 50 cm	≤ 50 cm

Fig. 1. Technical specifications of the LiDAR flights carried out by the National Geographic Institute LiDAR-PNOA coverage.

with the information from the GNSS base, the images captured by the RGB sensor (necessary for coloring the point cloud), the inertial measurement unit (IMU), and ground control points (GCP) to calculate the geodetic position of each return (Lozić & Štular, 2021; Wehr, 2017). The result is a point cloud, in which each point contains information on X, Y, Z, RGB, and Return (Rodriguez-Bulnes et al., 2022).

The main characteristic of an airborne LiDAR system is the recording of multiple returns from a single laser pulse, each corresponding to different surfaces or objects hit by the laser beam. These returns are recorded only if the return pulse's intensity exceeds a predefined threshold in the system. Therefore, a pulse impacting vegetation will produce a bounce on its surface layer, but part of the pulse's energy can pass through the vegetation, providing information about the tree structure (commonly known as penetration capability) (Instituto Geográfico Nacional, 2024).

Aspects such as penetration capability through vegetation (number of returns the sensor admits) and the density of points per square meter must be considered when choosing the LiDAR system to use. However, these theoretical values can be substantially modified depending on the aircraft's forward speed and flight altitude, with these parameters being inversely proportional to point density. The point cloud records for each point X, Y, Z, RGB, Intensity, and Return Number. One of the most important steps is the automatic classification of ground and non-ground points. This is a probabilistic process where any classification includes false positives (ground points classified as non-ground) and false negatives (non-ground points classified as ground) (Lozić & Štular, 2021). The ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) establishes the following

point cloud classification that allows better systematization and normalization of the record. Classes defined by ASPRS.

The present study aims to determine the optimal flight parameters (altitude and speed) to achieve laser penetration through vegetation, enabling a three-dimensional representation of the terrain and structures. This allows for the study of the landscape from an archaeological and heritage perspective. The study also aims to develop an analysis methodology applicable to future studies using other LiDAR systems and different types of vegetation.

The study area is located in the municipality of La Peza, in the western part of the Guadix region, on the northern slopes of Sierra Nevada, near the Marquesado del Zenete. The area is largely covered by dense pine vegetation, which completely prevents the identification of archaeological structures through aerial photography, hence the need to experiment with the LiDAR system. A total of 36 flights were conducted at different altitudes (70, 80, 90, 100, 110, and 120 meters) and different speeds (5, 6, 7, 8, 9, and 10 meters per second) for each altitude.

## 2. METHODOLOGY

The methodology followed has taken into account issues of graphic quality and geometric precision, allowing for the integration of the micro-spatial scale of archaeology and the macro-spatial scale of the landscape. To achieve this, the research followed the following workflow:

Before conducting fieldwork, it is necessary to plan the flight, including a preliminary study of the flight parameters: altitude, speed, overlaps between passes, etc. A prior reconnaissance of the area is also required to observe the presence of obstacles such as power lines, towers, structures, public roads, etc. Additionally, legal requirements for the execution of the aerial mission and weather control (wind intensity, rain, visibility, etc.) must be considered.

Once the situation of the area to be surveyed is known, the flight mission must be programmed in specific software, taking into account all the parameters from the preliminary study. In this case, the UGCS application (<https://www.ugcs.com>) was selected. This application allows for the programming of LiDAR missions and the loading

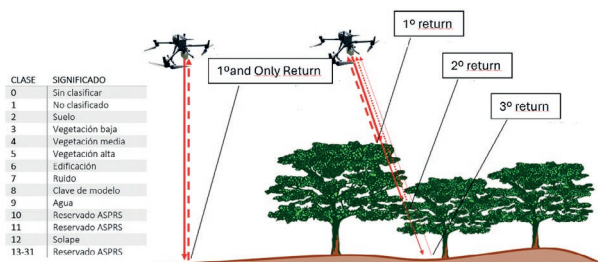


Fig. 2. Technical specifications of the LiDAR flights carried out by the National Geographic Institute LiDAR-PNOA coverage.

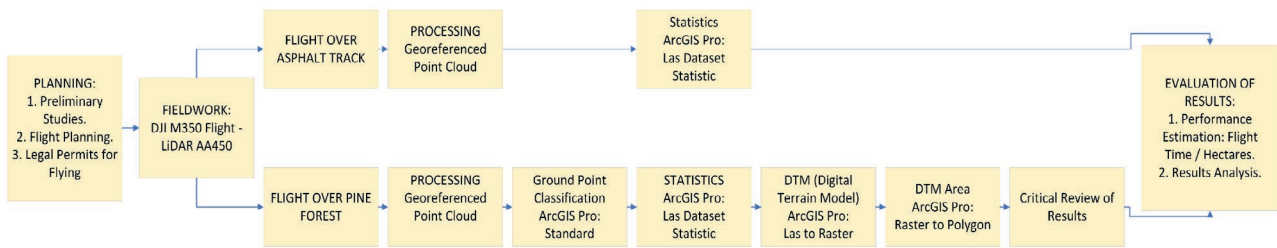


Fig. 3. Data collection, processing, and analysis workflow.

of a low-resolution digital terrain model (from IGN), which enables maintaining a constant flight altitude over the terrain, resulting in a point cloud with homogeneous density.

### 2.1 FIELDWORK

For our study, we have used the CHCNav brand LiDAR, model AlphaAir 450, whose components: ALS (Livox Avia), GNSS, INS and RGB camera (Sony APC 26 MPx) have been integrated into a housing that makes it a very robust and light device (1 kg), requiring professional UAV equipment for its assembly. In our case, a DJI Matrice 350 RTK has been used.

According to the technical characteristics provided by the manufacturer, the CHC AlphaAir 450 is capable of registering up to 3 returns, presenting a scan rate of 240 000 points/sec on the first return, 480 000 points/sec on the second return and 720 000 points/sec on the third return. Generating in a flight at 5 m/s and height of 50 m the density of points generated is 570 points/m<sup>2</sup>, while at an altitude of 100 m the density of points is

280 points/m<sup>2</sup>. The precise georeferencing of the data captured by the LiDAR makes it necessary to locate the position of the aircraft accurately and at all times, requiring post-processing synchronization, the GNSS of the UAV equipment and a fixed GNSS base, requiring the registration of the rinex (Receiver INdependent EXchange Format) data in both equipment. This data is essential to carry out the post-processing of the route followed by the UAV in the execution of the flight. In our study, a CHCNav i89 GNSS device was used.

Another important requirement, before starting the mission, is to calibrate its internal IMU (Inertial Measurement Unit), performing a small flight with a trajectory in the shape of an “8”, starting the mission automatically once it has concluded. (CHCNav, 2021b).

### 2.2. DATA PROCESSING

First, the LiDAR data is downloaded from the AA450 device using proprietary software from the brand, in our case CHCNav CoPre V2, which generates a hierarchical folder structure with all the organized information. This needs to be supplemented with the RINEX data obtained from the GNSS base station. The precise determination of the georeferenced coordinates of the base is carried out through post-processing by synchronizing the RINEX data from the fixed station with the RINEX data obtained from the RAP (Red Andaluza de Posicionamiento) permanent antenna network. After 3 hours of observation, the precision we obtained in the coordinates of the GNSS base is 1 mm.

Processing the raw data with CoPre V2 software results in an unclassified georeferenced point cloud. There are numerous software options (LasTools, Global Mapper, RStudio, ArcGIS Pro-3.3)



Fig. 4. DJI M350 RTK Equipment – AA450 LiDAR - i89 GNSS

for analyzing and classifying the point cloud. In our study, we used ArcGIS Pro-3.3 software, which allows for the classification of LiDAR point clouds, generation of digital terrain models, and data statistics within a single environment. We applied the “automatic terrain classification” algorithm with the following parameters: standard terrain detection method, last return detection algorithm, and 30 cm resolution DEM (Digital Elevation Model).

From this point on, the point clouds for the pine forest area contain two types of points: value 0 for unclassified points and value 2 for ground points.

### 2.3. STATISTICAL ANALYSIS AND DISCUSSION.

When flying at different altitudes, the area covered varies. To normalize the statistical data, all point clouds have been trimmed using a perimeter delimiting the study area. The statistical processing of each point cloud was carried out using the Las Dataset Statistic algorithm in ArcGIS.



Fig. 5. Perimeter of the study area: pine forest area and asphalt airfield.

First, we compared the results obtained over the asphalt track and the pine forest area, evaluating the penetration capability in vegetation. For each flight, we determined the point density per square meter based on the UAV’s travel speed and flight altitude.

As a premise, it is important to note that flights conducted over the asphalt track present only one return due to the impact on a solid surface, whereas flights over the pine forest area generate a higher number of points due to intermediate returns as the laser penetrates the vegetation.

		Point Density in Pine Forest						Point Density on Asphalt Track						
		Speed						Speed						
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5	
Flight height	120	127	155	171	195	222	266	120	130	145	163	186	217	260
	110	150	184	206	231	269	317	110	138	154	173	198	231	277
	100	185	219	248	277	328	383	100	155	172	193	221	258	310
	90	218	261	296	324	381	441	90	170	189	212	243	283	340
	80	234	301	333	366	437	508	80	190	211	237	271	316	379
70	284	372	410	449	539	629	70	221	245	276	315	368	441	

Fig. 6. Total density of dots per square meter.

According to the data obtained, comparing the point densities in both flight zones shows that point densities are similar at higher altitudes, while at lower altitudes and speeds, the point density in the pine forest area increases due to the multiple returns caused by the vegetation. Thus, we observe that at lower altitudes and speeds, better penetration of the laser pulse is achieved. Next, we analyzed the percentage of points classified as ground, confirming that in all flights, this percentage is similar, ranging from 37% to 40% of the total points obtained (with an average of 38%).

Subsequently, we analyzed the density of points classified as ground per square meter, observing that for a given point density, there are different combinations of altitude and speed. For example, analyzing the graph, we observe that for the same density of 90 points/m<sup>2</sup>, we can choose different combinations of altitude and speed (e.g., H=90 m V=10 m/s; H=100 m V=9 m/s; H=110 m V=8 m/s; H=120 m V=7 m/s). We can assert that by increasing the flight altitude by 10 meters and decreasing the speed by 1 m/s, or decreasing the flight altitude by 10 meters and increasing the speed by 1 m/s, the point density does not vary.

The purpose of our study is to determine the appropriate flight altitude and speed to detect archaeological evidence in areas with dense vegetation. This requires a critical analysis of the

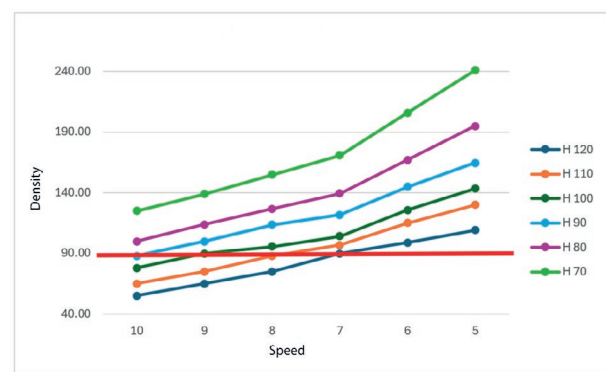


Fig. 7. Density of points classified as terrain. Example of speed and height for density of 90 pts/m<sup>2</sup>.

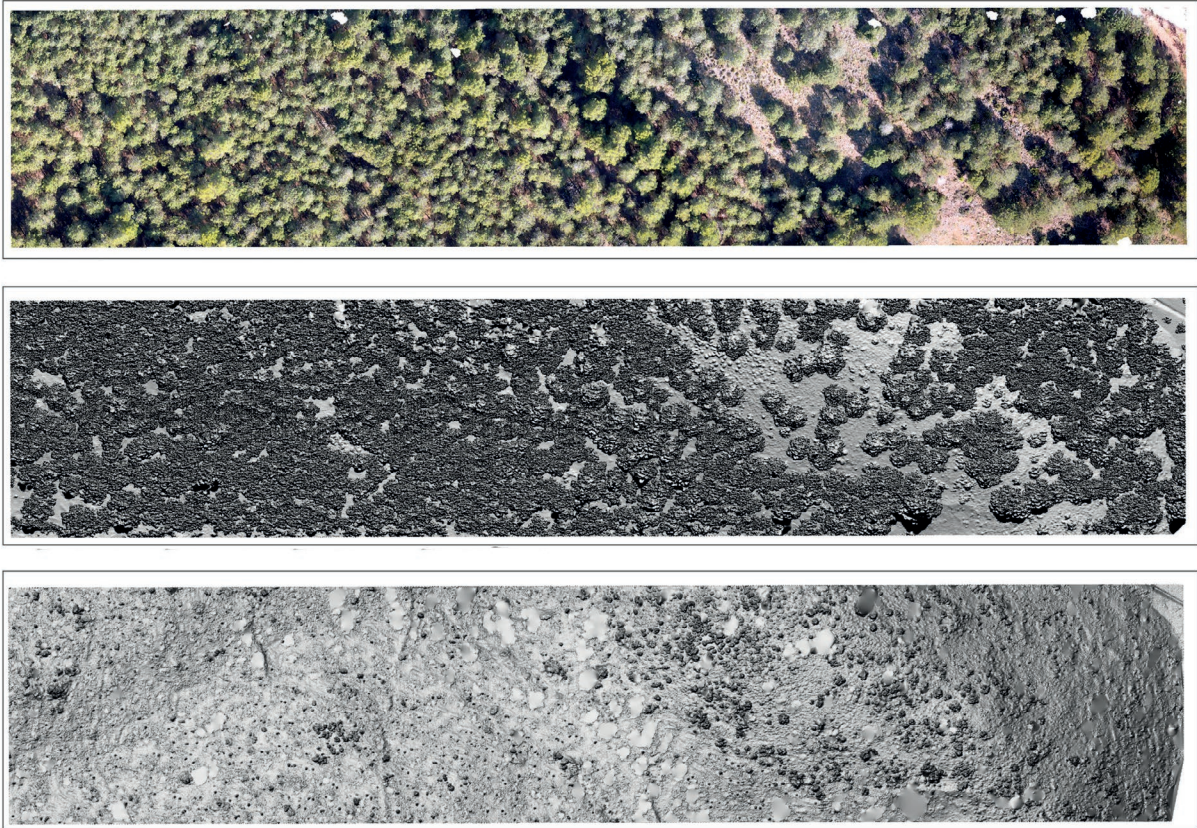


Fig. 8. Orto - DSM - DTM. Flight height 70 m Speed 5 m/s.

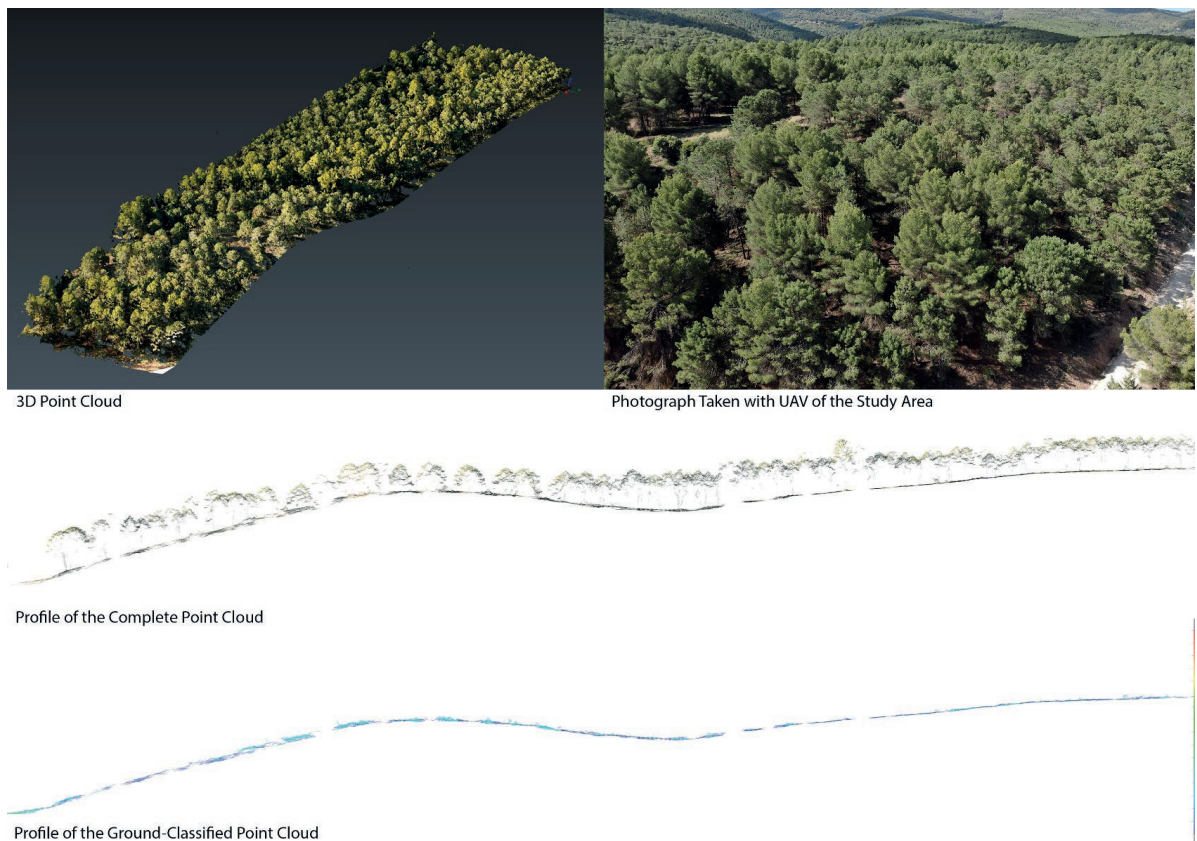


Fig. 9. 3D View of Point Cloud - Photograph of the Zone - Full Cloud Profile - Profile to Terrain Point Cloud.

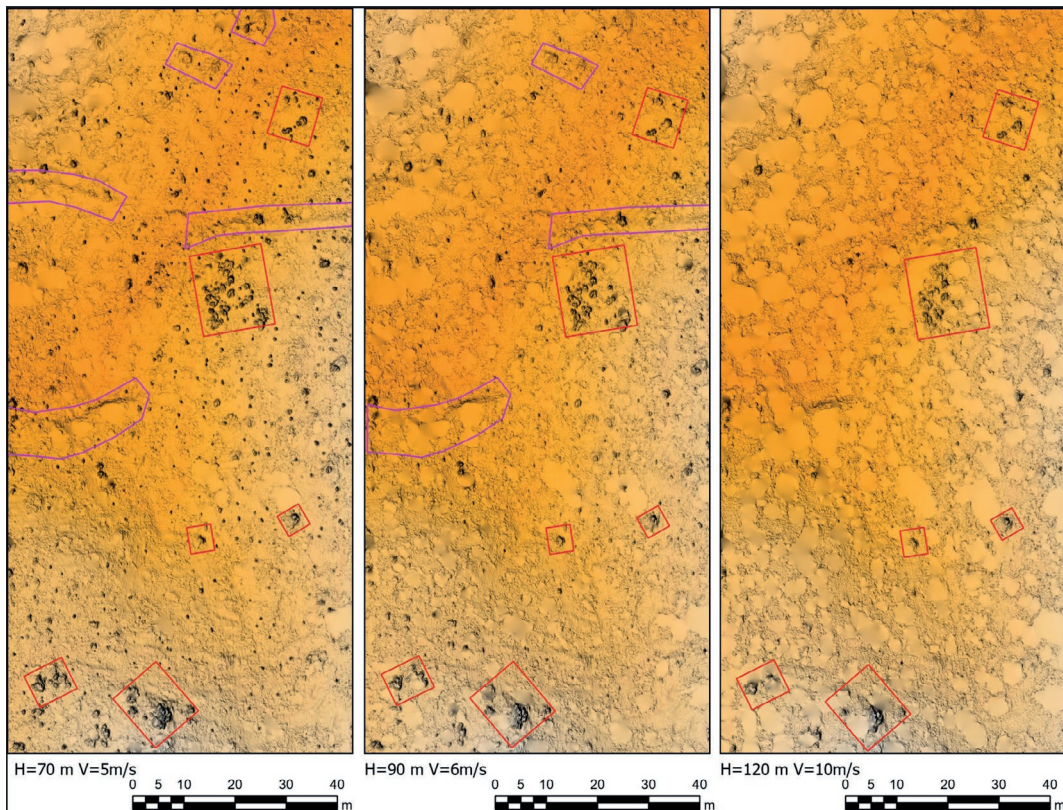


Fig. 10. Critical comparison of digital terrain models.

shapes observed in the digital terrain models, which must subsequently be verified in situ.

For the critical analysis of the results, we generated orthophotographs, a Digital Surface Model (DSM, calculated with all the points), and a Digital Terrain Model (DTM, calculated with the points classified as ground).

To verify the level of LiDAR penetration in vegetation, it is useful to create cross-sections of the point cloud (Fig. 9).

To continue with the critical analysis of the results, comparative views of the digital terrain models are generated, verifying the existence of elements beneath the pine forest.

In this comparison, the extreme values and one intermediate value of flight altitude and speed were taken (H=70 m V=5 m/s; H=90 m V=6 m/s; H=120 m V=10 m/s). The elements marked in red can be detected in all three models, losing a bit of definition as the flight altitude and speed increase, but they remain detectable. These are elements that protrude from the surface of the terrain, as shown in the following illustration (Fig. 11).

The elements marked in magenta barely protrude from the terrain, and some are not identifiable in

the mid-altitude flight, with none being detectable at the maximum flight altitude of 120 m.



Fig. 11. On-site verification of elements identified under the vegetation cover.

### 3. CONCLUSIONS

In this research, the CHCNav AlphaAir 450 LiDAR sensor, transported by a DJI Matrice 350 RTK UAV, was evaluated for obtaining a digital terrain model under dense vegetation (pine forest) for the



study of the landscape from an archaeological and heritage perspective. The obtained parameters will serve as a basis for future flight planning with the objective of achieving a detailed three-dimensional representation of the terrain and the structural elements present in the landscape. Ground-based laser equipment will need to be used to complete the record in areas with low definition. The study evaluated the two main parameters that directly influence the point cloud: flight altitude and UAV forward speed. It can be concluded, after extensive analysis of the field data, that at the lowest flight altitude and forward speed, there is greater penetration into the vegetation and the highest point density per square meter is achieved. These flight parameters affect the execution time of the flights, as shown in Fig. 12, which displays the times required for a flight covering a perimeter of 25 hectares, an area that fits within the legal limit for VLOS (Visual Line of Sight) flights. These times will decisively influence the batteries planning. The time invested in executing the flights is a critical factor in an archaeological prospecting project, especially when studying a large area of several hundred hectares.

		Speed					
		10	9	8	7	6	5
Flight height	120	8	9	10	12	14	16
	110	9	10	11	13	15	18
	100	10	11	12	14	16	19
	90	10	12	13	15	18	22
	80	12	13	14	16	19	23
	70	13	15	16	19	22	27

Fig. 12. Table of times in flying 25 hectares.

After critically evaluating the comparison of digital terrain model results, it is observed that by selecting an intermediate flight altitude and speed, it is possible to obtain a terrain representation

sufficiently defined to identify elements beneath dense vegetation, saving between 45% to 65% of the time.

In the initial planning phase, when selecting altitude and speed parameters, it should be noted that for a given point density, various combinations of altitude and speed will provide equivalent results (e.g., increasing the flight altitude by 10 meters and decreasing the speed by 1 m/s or decreasing the flight altitude by 10 meters and increasing the speed by 1 m/s does not change the point density).

To apply the conclusions obtained in the study, it is proposed: to plan the flight, studying all the conditioning factors of the area, selecting an initial flight altitude of 70 m (optimal height for maximum vegetation penetration). Depending on the area to be flown, the number of flights and their duration will be estimated by applying speeds of 7 or 8 m/s. These parameters will yield optimal results. If it is not possible to carry out the mission at 70m, the mission will be raised to 80 m, applying speeds of 7 or 6 m/s.

The methodology developed in this study can be applied in future studies with other LiDAR systems and in different types of vegetation, allowing for detailed landscape information from an archaeological and heritage perspective. This innovative approach in using UAV and LiDAR technology in archaeology and heritage will result in significant advances in the study and conservation of these environments.

## ACKNOWLEDGMENTS

Mr. Antonio Capel, CEO of AC21 Geospatial Consultancy. Official distributors of CHCNav in Spain. Thanks and gratitude for their collaboration and support, for providing all the technical material: DJI Matrice 350 RTK UAV, AA450 LiDAR and i89 GNSS.

## REFERENCES

- Antonio Esquivel, J., Antonio Benavides, J., & Javier Esquivel, F. (2012). El análisis de la forma de onda de los escáneres terrestres aplicados a la investigación arqueológica The waveform analysis of terrestrial laser scanning applied to archaeological research. 413–424.
- Castilla-Agredano, B., Checa, A. M., Nieto, M. G., Luis Domínguez Jiménez, J., Luis Dominguez-Jiménez, J., González-Nieto, M., Moreno-Alcaide, M., & Monterroso-Checa, A. (2021). Preparing rural heritage for another kind of Covid pandemic: heritage digitalization strategies in the Alto Guadiato Valley and Subbetica of Cordoba, Spain. 195–208. <https://doi.org/10.2423/i22394303v11n1p194>

CHCNav. (2021). CHCNAV AlphaAir 450 User Manual Version 2.0.

Fernández-Lozano, J., & Sanz-Ablanedo, E. (2021). Unraveling the morphological constraints on roman gold mining hydraulic infrastructure in nw spain. A uav-derived photogrammetric and multispectral approach. *Remote Sensing*, 13(2), 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs13020291>

Horn, S. W., & Ford, A. (2019). Beyond the magic wand: methodological developments and results from integrated Lidar survey at the ancient Maya Center El Pilar. *Science and Technology of Archaeological Research*, 5(2), 164–178. <https://doi.org/10.1080/20548923.2019.1700452>

Instituto Geográfico Nacional. (2024). IGN LIDAR.

Kokalj, Ž., & Somrak, M. (2019). Why not a single image? Combining visualizations to facilitate fieldwork and on-screen mapping. *Remote Sensing*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/rs11070747>

López, J. A. B., José, M., Civantos, M., & Collazo, J. R. (2020). Architectural survey and archaeological analysis of the pinar castle as a starting point for its conservation. *Virtual Archaeology Review*, 11(22), 95–115. <https://doi.org/10.4995/var.2020.12397>

Lozić, E., & Štular, B. (2021). Documentation of Archaeology-Specific Workflow for Airborne LiDAR Data Processing. *Geosciences*, 11(1), 26. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010026>

Pietro Brogiolo, G., & Sarabia-Bautista, J. (2017). Land, rivers and marshes: changing landscapes along the Adige River and the Euganean Hills (Padua, Italy).

Rodriguez-Bulnes, J., Benavides Lopez, J. A., Romero Pellitero, P., Martin Civantos, J. M., & Rouco Collazo, J. (2022). The documentation of archaeological heritage through aerial photogrammetry and UAS-based LiDAR: the case study of the Espique valley (La Peza, Spain). *Disegnarecon*. <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.29.2022.12>

Wehr, A. (2017). LiDAR systems and calibration. In *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. <https://doi.org/10.1201/9781420051438-4>

Zavod Filozofskog Fakulteta Sveučilišta Zagrebu, A. U., Gregl, M., & zavod Filozofskog fakulteta, A. (2018). Juraj PAVUK (Nitra), Guido ROSADA (Padova). Tihomila TEŽAK-GREGL. [www.ebscohost.com](http://www.ebscohost.com)

**How to cite this article:** García-Valldecabres, J., Romani López, C., Martín Civantos, J.M. 2024. “Hybrid methodology for the representation of architecture: The *Llotgeta* of the Central Market of Valencia” *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, No. 20, Valencia: Universitat Politècnica de València. pp. 91-104. <https://doi.org/10.4995/ege.2024.21840>.

# DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DEL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO MEDIANTE LIDAR SOBRE UAV. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS OPTIMOS DE VUELO

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante la última década la aplicación de técnicas de teledetección al estudio del paisaje cultural y el patrimonio arqueológico han experimentado una gran evolución gracias a las mejoras informáticas, como a las nuevas tecnologías de adquisición de datos. El estudio del paisaje refleja aspectos tanto físicos como culturales y es el resultado de la interacción entre la actividad humana y los procesos naturales el que se desarrollan. El conocimiento de su orografía es esencial para ayudar a determinar de manera adecuada los lugares idóneos para las actividades y los desarrollos del ser humano, para cartografiar, generar modelos 3D, definir cuencas hidrográficas, cartografiar zonas inundables, inventarios forestales, predecir la propagación de fenómenos físicos (polución, deslizamientos de laderas...), estudiar los ecosistemas o estudiar el cambio climático. En este sentido, la tecnología que permite capturar con más precisión la información de elevaciones del terreno es el LiDAR.

Las aplicaciones del LiDAR en la localización y documentación de yacimientos arqueológicos han sido demostradas ya en numerosas ocasiones, en especial en aquellos casos en los que existe una amplia cubierta vegetal ocultando las estructuras. (Castilla-Agredano et al., 2021; Fernández-Lozano & Sanz-Ablanedo, 2021; Horn & Ford, 2019; Kokalj & Somrak, 2019; López et al., 2020; Pietro Brogiolo & Sarabia-Bautista, 2017; Zavod Filozofskog Fakulteta Sveučilišta Zagrebu et al., 2018)

Su desarrollo y consolidación a lo largo del siglo XX ha permitido obtener documentos con gran calidad. En el año 2009 tras realizar una serie de pruebas piloto, y atendiendo a la necesidad por parte de algunos de los socios del proyecto PNOA de poder disponer de modelos digitales del terreno con mayor precisión, surgiendo de esta manera el proyecto PNOA-LiDAR (<https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar>) y cuyo objetivo es capturar información tridimensional mediante sensores aerotransportados LiDAR de todo el territorio de España, generando una serie de productos de gran utilidad a partir de esta captura (nube de puntos con coordenadas georreferenciadas, Modelos Digitales del Terreno...). Ciclos del proyecto: (Instituto Geográfico Nacional, 2024).

Como se puede apreciar en la tabla resumen, la máxima densidad de puntos se alcanza con la tercera cobertura (2022 – 2025) obteniendo 5 puntos por m<sup>2</sup>, si bien en la actualidad aún no se han publicado ningún dato de la tercera cobertura.

El LiDAR es una técnica de teledetección que utiliza un sensor activo, basado en pulsos de luz láser. Un sistema LiDAR aéreo está compuesto por: Vehículo que lo transporta que puede ser un avión, helicóptero o un UAV. Sistema de escáner láser (ALS): encargado

de emitir los pulsos de luz láser, GNSS: sistema global de navegación por satélite, encargado de registrar la posición georreferenciada y altura del sistema; Sistema de navegación inercial (INS): encargado de registrar los parámetros de rotación, inclinación y encabezamiento del sistema y por una cámara RGB: (Opcional) que registra las imágenes. y que servirá para dotar de color a la nube de puntos resultante y realizar procesos fotogramétricos. (Antonio Esquivel et al., 2012)

La distancia entre el sensor LiDAR y el objeto se determina por la medición del tiempo que tarda la onda desde que es emitida y vuelve a su origen tras el impacto sobre la superficie. Los datos brutos del LiDAR, también denominados datos primarios, constituyen una serie de mediciones del tiempo y las intensidades de los pulsos devueltos. (Lozić & Štular, 2021). En la etapa de registro estos datos se correlacionan con la información de la base GNSS, las imágenes capturadas por el sensor RGB (necesarias para colorear la nube de puntos), la unidad de medición inercial (IMU) y los puntos de apoyo (GCP) para calcular la posición geodésica de cada retorno. (Lozić & Štular, 2021; Wehr, 2017). Como resultado se obtiene una nube de puntos, en la que cada punto contiene información de X, Y, Z, RGB, Retorno. (Rodríguez-Bulnes et al., 2022)

La característica principal de un sistema LiDAR aéreo es el registro de varios retornos, es decir en un solo pulso láser se pueden registrar múltiples retornos, correspondiendo cada uno a diferentes superficies u objetos alcanzados por el haz láser. Estos retornos son registrados sólo si la intensidad del pulso de vuelta supera un umbral predefinido en el sistema. Por tanto, un pulso al impactar con la vegetación producirá un rebote en su capa superficial, pero parte de la energía del pulso puede pasar a través de la vegetación proporcionando información de la estructura arbórea (conocido habitualmente como capacidad de penetración). (Instituto Geográfico Nacional, 2024)

Aspectos como la capacidad de penetración a través de la vegetación (nº de rebotes que admite el sensor) y la densidad de puntos por metro cuadrado, deben ser tenidos en cuenta en la elección del sistema LiDAR a utilizar, pero estos valores teóricos pueden ser modificados sustancialmente en función de la velocidad de avance de la aeronave y la altura del vuelo, siendo estos parámetros inversamente proporcionales a la densidad de puntos. La nube de puntos registra para cada punto X, Y, Z, RGB, Intensidad, Número de retorno. Se puede afirmar que uno de los pasos más importantes es la clasificación automática de puntos de terreno o no terreno. Se trata de proceso probabilístico, en la que cualquier clasificación incluye fallos positivos (puntos de tierra clasificados como no suelo) y falsos negativos (puntos no terrestres clasificados como suelo). (Lozić

& Štular, 2021). La ASPRS (Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección), establece la siguiente clasificación de la nube de puntos que permite una mejor sistematización y normalización el registro.

El presente estudio se realiza para obtener los parámetros óptimos de vuelo (altura y velocidad), para lograr una penetración del láser a través en la vegetación y poder realizar una representación tridimensional del terreno y estructuras que permita estudiar el paisaje desde un punto de vista arqueológico y patrimonial. Generando una metodología de análisis aplicable a futuros estudios con otros sistemas LiDAR y diferente tipología de vegetación.

La zona de trabajo se encuentra ubicada en el término municipal de la Peza, en la parte occidental de la comarca de Guadix, en las faldas de la vertiente norte de Sierra Nevada, próximo a el Marquesado del Zenete. Presenta una gran superficie cubierta por una densa vegetación de pinar, la cual impide absolutamente la identificación mediante fotografía aérea de las estructuras arqueológicas, y de ahí la necesidad de experimentar el sistema LiDAR.

En total se han realizado 36 vuelos a distintas alturas: (70, 80, 90, 100, 110 y 120 m.) y a distintas velocidades: (5, 6, 7, 8, 9 y 10 m/s) para cada altura.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología seguida, ha tenido en cuenta cuestiones de calidad gráfica y precisión geométrica permitiendo la integración de la escala microespacial de la arqueología y la escala macroespacial del paisaje, para ello, la investigación ha seguido el siguiente flujo de trabajo.

Previo a la realización de los trabajos de campo, es necesaria una planificación del vuelo debiendo realizar un estudio previo de los parámetros del vuelo: altura, velocidad, solapamientos entre pasadas, etc. Reconocimiento previo de la zona, observando la presencia de obstáculos como tendidos eléctricos, torres, estructuras, vías públicas, etc. Requerimientos legales para la ejecución de la misión aérea y control de la meteorología: intensidad del viento, lluvia, visibilidad, etc.

Conocida la situación de la zona sobre la que actuar, se ha programar la misión de vuelo en un software específico teniendo en cuenta todos los parámetros del estudio previo. En este caso se ha seleccionado la aplicación UGCS (<https://www.ugcs.com>), con la que se pueden programar misiones LiDAR y cargar un modelo digital del terreno de baja resolución (IGN), lo que permite mantener una altura de vuelo constante sobre el terreno lo que permite una nube de puntos con densidad homogénea.

## 2.1 TRABAJO DE CAMPO

Para nuestro estudio se ha utilizado el LiDAR de marca CHCNav, modelo AlphaAir 450, cuyos componentes: ALS (Livox Avia), GNSS, INS y cámara RGB (Sony APC 26 MPx) se hayan integrados en una carcasa que lo hace un dispositivo muy robusto y ligero (1 kg), precisando equipos UAV profesionales para su montaje. En nuestro caso se ha utilizado un DJI Matrice 350 RTK.

Según las características técnicas facilitadas por el fabricante el AlphaAir 450 de CHC es capaz de registrar hasta 3 retornos, presentando una tasa de exploración de 240000 puntos/seg en el primer retorno, 480000 puntos/seg con el segundo retorno y 720000 puntos/seg con el tercer retorno. Generando en un vuelo a 5 m/s y altura de 50 m la densidad de puntos generada es de 570 puntos/m<sup>2</sup>, mientras que a una altura de 100 m la densidad de puntos es 280 puntos/m<sup>2</sup>.

La georreferenciación precisa de los datos capturados por el LiDAR obliga a localizar con exactitud y en todo momento la posición de la aeronave, necesitando para ello sincronizar postproceso, el GNSS del equipo UAV y una base fija GNSS necesitando el registro de los datos rinex (*Receiver INdependent EXchange Format*) en ambos equipos. Estos datos son imprescindibles para realizar el postproceso de la ruta seguida por el UAV en la ejecución del vuelo. En nuestro estudio se ha utilizado un equipo GNSS CHCNav i89.

Otro requisito importante, antes de comenzar la misión, consiste en calibrar su IMU (Inertial Measurement Unit) interno, realizando para ello un pequeño vuelo con una trayectoria en forma de "8", comenzando la misión automáticamente una vez que ha concluido este. (CHCNav, 2021).

## 2.2. PROCESADO DE DATOS

En primer lugar, se realiza la descarga de los datos del LiDAR del equipo AA450 utilizando un software propio de la marca, en nuestro caso CHCNav CoPre V2, que genera una jerarquía de carpetas con toda la información organizada, es necesario complementarla con los datos rinex obtenidos del equipo base GNSS. Para la determinación precisa de las coordenadas georreferenciadas de la base se realiza mediante postproceso mediante la sincronización de los datos Rinex del equipo fijo y los datos Rinex obtenidos de la Red permanente de antenas de la RAP (Red Andaluza de Posicionamiento). Tras 3 horas de observación, la precisión que hemos obtenido en las coordenadas de la base GNSS es de 1 mm. El procesado de datos brutos con el software CoPre V2 permite obtener una nube de puntos georreferenciada sin clasificar.

Existe numeroso software (LasTools, Global Mapper, R Studio, ArcGIS Pro-3.3) que analizan y clasifican la nube de puntos. En nuestro caso de estudio se ha utilizado el software ArcGIS Pro-3.3, que permite realizar en un solo entorno la clasificación de las nubes de puntos

LiDAR, generación de modelos digitales del terreno y estadística de datos, aplicando el algoritmo “clasificación automática del terreno”, con los parámetros: método de detección del terreno estándar, algoritmo de detección: último y resolución DEM (Digital Elevation Model) 30 cm.

A partir de este momento las nubes de la zona de pinar contienen 2 tipos de puntos: valor 0 sin clasificar y valor 2 para el suelo.

### 2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y DISCUSIÓN.

Al realizar vuelos a distintas alturas, el área ocupada es variable. Para normalizar los datos estadísticos se han recortado todas las nubes de puntos con un perímetro delimitador de la zona de estudio. El procesamiento estadístico de cada nube de puntos se ha realizado mediante el algoritmo Las Dataset Statistic de ArcGIS

En primer lugar, comparamos los resultados obtenidos sobre la pista asfaltada y la zona de pinar, evaluando la capacidad de penetración en vegetación, determinando para cada uno de los vuelos la densidad de puntos por metros cuadrado en función de la velocidad de desplazamiento del UAV y la altura de vuelo.

Como premisa hay que tener en cuenta que los vuelos realizados sobre la pista asfaltada solo presentan 1 rebote, al impactar sobre una superficie sólida, mientras que los realizados sobre la zona de pinar han de generar un mayor número de puntos debido a los rebotes intermedios al penetrar en la vegetación.

Según los datos obtenidos, al comparar las densidades de puntos en ambas zonas de vuelo se observa que las densidades de puntos son similares a mayor altura, mientras que a menor altura y velocidad la densidad de puntos en la zona de pinar aumenta debido a la multitud de retornos debido a la vegetación, por lo que observamos que a menor altura y velocidad se obtiene una mejor penetración del pulso láser.

Seguidamente hemos analizado el porcentaje de puntos clasificados como terreno, comprobando que en todos los vuelos este porcentaje es similar, oscilando entre 37% a 40% del total de puntos obtenidos. (38% de promedio).

Posteriormente analizamos la densidad de puntos clasificados como terreno por metros cuadrado, observando que para una determinada densidad de puntos existen distintas combinaciones de altura/velocidad (Por ejemplo, analizando el grafico observamos que para una misma densidad de 90 pto/m<sup>2</sup> podemos elegir diferentes combinaciones de altura y velocidad H=90 m V=10 m/s; H=100 m V=9 m/s; H=110 m V=8 m/s; H=120 m V=7 m/s). Podemos afirmar que al aumentar 10 metros la altura de vuelo y disminuir la velocidad en 1 m/s o disminuir 10 metros la altura de vuelo y aumentar la velocidad en 1 m/s la densidad de puntos no varía.

La finalidad de nuestro estudio es determinar la altura de vuelo y velocidad adecuados para poder detectar evidencias arqueológicas que se encuentran en zonas con densa vegetación, necesitando un análisis crítico de las formas que se observan en los modelos digitales del terreno que posteriormente han de ser comprobadas *in situ*. Para la realización del análisis crítico de los resultados se han generado la ortografía, MDS (Modelo digital de superficies, calculado con todos los puntos) y MDT (Modelo digital del terreno, calculado con los puntos clasificados como terreno).

Para comprobar el nivel de penetración del LiDAR en la vegetación es útil realizar secciones a la nube. (Fig. 9)

Para continuar con el análisis crítico de los resultados se generan vistas comparativas de los modelos digitales del terreno, comprobando la existencia de elementos bajo la masa de pinar.

En esta comparativa se han tomado los valores extremos y uno intermedio de altura de vuelo y velocidad (H=70 m V=5 m/s; H=90 m V=6 m/s; H=120 m V=10 m/s). Los elementos señalados en rojo se pueden detectar en los 3 modelos, perdiendo un poco de definición al aumentar la altura de vuelo y la velocidad, pero siguen siendo detectables. Se trata de elementos que sobresalen de la superficie del terreno como se puede apreciar en la siguiente ilustración. (Fig. 11)

Los elementos señalados en magenta no sobresalen a penas del terreno y algunos no son identificables en el vuelo a media altura y ninguno a la máxima altura de vuelo 120 m.

### 3. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha evaluado el sensor LiDAR CHCNav AlphaAir 450 transportado por un UAV DJI Matrice 350 RTK, aplicándolo a la obtención de un modelo digital de terreno bajo densa vegetación (pinar) para el estudio del paisaje desde el punto de vista arqueológico y patrimonial. Los parámetros obtenidos servirán de base para la planificación futura de vuelos con el objetivo de obtener una representación tridimensional detallada del terreno y de los elementos estructurales presentes en el paisaje, debiendo completar el registro con equipos láser desde tierra en aquellas zonas con poca definición. Para ello se han evaluado los dos principales parámetros que influyen directamente en la nube de puntos: altura de vuelo y velocidad de avance del UAV. Se puede afirmar, tras el extenso análisis realizado sobre los datos de campo, que a la menor altura de vuelo y velocidad de avance de la aeronave se produce una mayor penetración en la vegetación y se produce la mayor densidad de puntos por metros cuadrado. Estos parámetros de vuelo condicionan el tiempo de ejecución de los vuelos, como se puede apreciar en la Fig. 12, donde se muestra los tiempos empleados en el vuelo de un perímetro de 25 hectáreas, superficie que se ajusta al límite legal para vuelos VLOS (vuelos dentro del alcance

visual del piloto). Estos tiempos influirán de manera decisiva en la planificación de las baterías necesarias, así como en ejecución de los vuelos de prospección arqueológica, cuando se pretende estudiar una amplia zona de varios cientos de hectáreas.

Tras evaluar la comparación crítica de resultados de modelos digitales del terreno, se observa que seleccionando una altura de vuelo y velocidad intermedia (indicar algunas cifras) es posible obtener una representación del terreno lo suficientemente definida como para identificar elementos bajo la densa vegetación, ahorrando entre un 45% a 65% en el tiempo de ejecución.

En la fase inicial de planificación, al seleccionar los parámetros de altura y velocidad se ha de tener en cuenta que para determinada densidad de puntos por metro cuadrado existen distintas combinaciones de altura/velocidad proporcionando resultados equivalentes, es decir, aumentar 10 metros la altura de vuelo y disminuir la velocidad en 1 m/s o disminuir 10 metros la altura de vuelo y aumentar la velocidad en 1 m/s la densidad de puntos no varía.

Para la aplicación de las conclusiones obtenidas en el estudio de la planificación de futuros vuelos se propone: al planificar los planos de vuelo, estudiar todos los condicionantes de la zona, seleccionar inicialmente una altura de vuelo inicial de 70 m (altura óptima para conseguir una penetración máxima en la vegetación). En función de la superficie a volar, estimar el número de vuelos y su duración aplicando velocidad de 7 ó 8 m/s. Estos parámetros conseguirán unos resultados óptimos. En caso de no poder ejecutar la misión a 70m, elevaremos la misión a 80m aplicando velocidades de 7 ó 6 m/s.

La metodología desarrollada en este estudio podrá ser aplicada en futuros estudios con otros sistemas LIDAR y en diferentes tipos de vegetación, permitiendo obtener información detallada del paisaje desde un punto de vista arqueológico y patrimonial. Este enfoque innovador en la utilización de tecnología UAV y LIDAR en la arqueología y el patrimonio han dado como resultado importantes avances en el estudio y la conservación del patrimonio

## **AGRADECIMIENTOS**

D. Antonio Capel, CEO de AC21 Consultora-Consultora Geoespacial. Distribuidores oficiales de CHCNav en España. Agradecimiento y gratitud por su colaboración y apoyo, por facilitar todo el material técnico: DJI Matrice 350 RTK UAV, AA450 LiDAR e i89 GNSS.