

# upna

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

## **ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y BIOCIENCIAS**

### ***NEKAZARITZAKO INGENIARITZAKO ETA BIOZIENTZIETAKO GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA***

CARACTERIZACIÓN DE LÍNEAS Y TORRES ELÉCTRICAS MEDIANTE VUELOS UAS

presentado por

AITOR ANDREU IRAZOLA(e)k

*aurkeztua*

MASTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN  
*UNIBERTSITATE MASTERRA INFORMAZIO GEOGRAFIKOKO SISTEMETAN ETA TELEDETEKZIOAN*



SEPTIEMBRE, 2021 / 2021, IRAILA



## Abstract

In recent years, projects or works related to UAV (Unmanned Aerial Vehicles) have increased exponentially. In this case, the research focuses on two projects that, although they use different techniques (one focuses on LiDAR remote sensing and the other on photogrammetry) share the same main objective: The evaluation of the usefulness of both techniques in the characterization of powerlines and transmission towers in the study area. The starting data have been obtained thanks to the equipment provided by the company Fuvex Civil SL. Finally, both techniques have proven to be useful for the stated objective, although LiDAR remote sensing shows better results in this investigation.

Keywords: photogrammetry, LIDAR, UAV, power lines, transmission towers.

## Resumen

En los últimos años, los proyectos o trabajos relacionados con los vehículos aéreos no tripulados han aumentado exponencialmente. En este caso, la investigación se centra en dos proyectos que, si bien utilizan diferentes técnicas (una focalizada en la teledetección LiDAR y la otra en fotogrametría) comparten un mismo objetivo principal: La evaluación de la utilidad de ambas técnicas en la caracterización de líneas y torres eléctricas en el área de estudio. Los datos de partida se han obtenido gracias al equipamiento facilitado por la empresa Fuvex Civil SL. Por último, ambas técnicas han demostrado ser útiles para el objetivo establecido, aunque la teledetección LiDAR muestra mejores resultados en esta investigación.

Palabras clave: fotogrametría, LIDAR, UAV, líneas eléctricas, torres eléctricas.

## Índice de contenidos.

1. Introducción y objetivos .....	1
2. Antecedentes.....	2
2.1. Fotogrametría .....	2
2.2. Teledetección LiDAR.....	5
3. Materiales y métodos.....	8
3.1. Área de estudio .....	8
3.2. Material de partida .....	9
3.2.1. Fotogrametría .....	9
3.2.2. Teledetección LiDAR .....	10
3.3. Procesamiento fotogramétrico.....	12
3.3.1. Proyecto sin puntos de apoyo .....	12
3.3.2. Proyecto con puntos de apoyo .....	17
3.4. Procesamiento de datos LiDAR .....	18
3.4.1. Procesamiento de datos en <i>Shuttle</i> .....	20
3.4.2. Procesamiento de datos en <i>g-AirHawk</i> .....	27
3.4.3. Creación de productos mediante <i>LAStools</i> y <i>Python</i> .....	29
4. Resultados y discusión.....	31
4.1. Procesamiento fotogramétrico de imágenes.....	31
4.1.1. Proyecto sin puntos de apoyo .....	31
4.1.2. Proyecto con puntos de apoyo .....	35
4.2. Procesamiento de datos LiDAR .....	40
4.2.1. Procesamiento de datos en <i>g-AirHawk</i> .....	40
4.2.2. Creación de productos mediante <i>LAStools</i> y <i>Python</i> .....	43
5. Conclusiones.....	52
6. Bibliografía.....	54
7. ANEXOS.....	59
ANEXO 1: Diagrama de flujo de la aerotriangulación .....	59
ANEXO 2: Mapa de ubicación de la zona de estudio .....	60
ANEXO 3: Script de Python para la construcción del modelo 3d.....	61

## Índice de figuras.

Figura 1: Sistemas GNSS e INS incorporados en un UAV. Fuente: Sun et al., 2020. ....	3
Figura 2: Relación entre el tamaño de píxel sobre el terreno y sobre la imagen. Fuente: Granados, 2019. ....	3
Figura 3: Puntos homólogos existentes entre dos imágenes. Fuente: Casson et al., 2002. ....	4
Figura 4: Pulsos emitidos y de retorno en la tecnología LiDAR. Fuente: Marinebiotech, 2020. ....	6
Figura 5: Ortofotografía de máxima actualidad de la zona de interés. Fuente: IDENA. ....	8
Figura 6: Aeronave empleada para la captura de imágenes. Fuentes: Elaboración propia. ....	9
Figura 7: Aeronave empleada para la captura de datos LiDAR. Fuente: Elaboración propia. ....	10
Figura 8: Sistema LiDAR empleado para la captura de datos. Fuente: Geosun. ....	11
Figura 9: Archivos de partida del proyecto LiDAR. ....	12
Figura 10: Datos de longitud, latitud, altitud y precisión estimada de las imágenes de partida. ....	13
Figura 11: Parámetros de calibración del sensor. ....	13
Figura 12: Sistema de referencia y ángulos de rotación del proyecto. ....	14
Figura 13: Parámetros de orientación relativa. ....	14
Figura 14: Configuración para la creación de la nube densa de puntos. ....	15
Figura 15: Configuración para la creación de la malla. ....	16
Figura 16: Configuración para la creación del ortomosaico. ....	16
Figura 17: Configuración para la creación del MDE. ....	17
Figura 18: Configuración para la creación del ortomosaico. ....	18
Figura 19: Parámetros para la conversión de formato KQS a RINEX. ....	20
Figura 20: Información de la base para adquirir posiciones GNSS. ....	21
Figura 21: Información del sistema LiDAR para adquirir GNSS. ....	21
Figura 22: Trayectoria de vuelo visualizado en Shuttle. ....	22
Figura 23: Trayectoria de vuelo con parámetros de cada punto de la trayectoria. ....	22
Figura 24: Parámetros del sistema de coordenadas empleado en el proyecto. ....	23
Figura 25: Configuración para obtener el fichero GNSS definitivo. ....	23
Figura 26: Apartado de “GNSS results” en el proyecto INS. ....	24
Figura 27: Apartado de “IMU” en el proyecto INS. ....	24
Figura 28: Trayectoria de vuelo basada en el sistema de navegación inercial. ....	25
Figura 29: Trayectoria de vuelo con los sistemas GNSS e INS integrados. ....	26
Figura 30: Configuración para obtener el fichero INS definitivo. ....	26
Figura 31: Archivos de partida para el procesamiento en g-AirHawk. ....	27
Figura 32: Parámetros del sistema LiDAR g-AirHawk GS-100M. ....	28
Figura 33: Visualización de las tres líneas de vuelo de la trayectoria. ....	29
Figura 34: Diagrama de flujo de los pasos en Python. ....	31
Figura 35: Nube densa de puntos sin GCP. ....	32
Figura 36: Modelo 3D sin GCP. ....	33
Figura 37: Ortomosaico sin GCP. ....	34
Figura 38: Visualización simultánea de ortomosaico sin GCP y ortofoto de máxima actualidad. ....	35
Figura 39: Nube densa de puntos con GCP. ....	36
Figura 40: Modelo 3D con GCP. ....	37
Figura 41: Modelo Digital de Elevaciones con GCP. ....	38
Figura 42: Ortomosaico con GCP. ....	39
Figura 43: Visualización simultánea de ortomosaico con GCP y ortofoto de máxima actualidad. ....	40
Figura 44: Visualización zona de estudio completa en FugroViewer aplicando la paleta de colores a las alturas. ....	41
Figura 45: Visualización 3D de la zona de estudio en FugroViewer. ....	42
Figura 46: Perfil de la zona de torres y cables. ....	42
Figura 47: Superposición entre las líneas de vuelo representada en azul turquesa. ....	43

Figura 48: Producto ráster de intensidad de puntos.....	44
Figura 49: Histograma del raster de densidad de puntos. ....	45
Figura 50: Archivo kml que limita la zona de estudio.....	46
Figura 51: Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio. ....	47
Figura 52: Histograma del Modelo Digital del Terreno. ....	47
Figura 53: Modelo Digital de Superficies de la zona de estudio. ....	48
Figura 54: Histograma del Modelo Digital de Superficies. ....	49
Figura 55: Modelo sobre Alturas de Suelo de la zona de estudio. ....	50
Figura 56: Histograma del Modelo sobre Alturas del Suelo.....	51
Figura 57: Modelo 3D de la zona de estudio.....	52

## Índice de tablas.

Tabla 1: Información disponible en la versión LAS1.4. Fuente: ASPRS, 2019. ....	7
Tabla 2: Ficha técnica del sensor Sony ILCE-6000. Fuente: Sony. ....	9
Tabla 3: Ubicación de los puntos de apoyo en el sistema WGS84. ....	10
Tabla 4: Ficha técnica de la unidad LiDAR y la unidad POS del sistema g-AirHawk GS-100M. Fuente: Geosun. .....	11

## 1. Introducción y objetivos

Son cada vez más frecuentes las investigaciones relacionadas con los UAV (acrónimo en inglés de *Unmanned Aerial Vehicle*, vehículos aéreos no tripulados); también llamados drones, coloquialmente. Esto se debe al gran abanico de oportunidades y usos que ofrecen: Por ejemplo, al haber tanta variedad en cuanto a sus características (tamaño, tipo de sensor y de motor etc.) su uso puede aplicarse en muchos ámbitos diferentes (Shakhatreh et al., 2019). Además, cabe recalcar que su coste es inferior si se compara con otros métodos de vuelo (por ejemplo, un avión) e igualmente ofrece una mayor versatilidad que estos (Castanheira, Monteiro & Lobo, 2016).

Dentro de los posibles ámbitos en los que se utilizan estos equipos, se encuentran tanto la fotogrametría como la tecnología LiDAR (acrónimo en inglés de *Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*) (Colomina & Molina, 2014). Por un lado, la fotogrametría se presenta como el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal se basa en conocer tanto las posiciones como las dimensiones de los elementos a caracterizar. A partir de estas, se obtienen mapas o planos de la cubierta terrestre, que son aplicados en el ámbito de interés (Kraus, 2007).

A su vez, la tecnología LiDAR, se podría definir como el dispositivo capaz de determinar distancias entre un emisor láser y una superficie empleando pulsos electromagnéticos (Coromines, Blanco & Ruiz, 2005). Esta se introdujo como una técnica de teledetección activa (por lo que se emiten pulsos de radiación electromagnética) usado para el procesamiento de nubes de puntos (Weitkamp, 2005). Gracias a ello, ofrece una gran diversidad en los campos donde se aplica, y, además, brinda importantes beneficios a estos (Risbøl & Gustavsen, 2018). Este último concepto

En los últimos años, ambas tecnologías han sido empleadas para la caracterización de líneas y torres de alta tensión. Se ha visto que la fotogrametría es una herramienta de gran utilidad y bajo coste (en comparación con el LiDAR) a la hora de medir la influencia de la vegetación en la generación de arcos de descarga, lo que resulta en la interrupción de las fuentes de alimentación (Zhang et al., 2017). Además, también ha sido comprobado que la teledetección LiDAR es capaz de generar modelos de gran precisión en zonas de difícil acceso (áreas montañosas o boscosas) brindando información de detalle sobre el estado de los cables y la altura de las torres (Qin et al., 2017).

Siguiendo con esta problemática, el objetivo principal de este trabajo es el empleo y posterior evaluación de las dos tecnologías mencionadas para la caracterización e identificación de los elementos de interés (torres y líneas de alta tensión) en la zona de estudio situada en Funes (Navarra). Con ese fin, en la metodología de ambos proyectos se combinan el trabajo de campo (vuelo para recogida de información) con el procesamiento de los datos de partida; donde utilizando distintos tipos de software, el objetivo es conseguir los productos deseados. A su vez, dentro de la fotogrametría se presentan dos proyectos donde el objetivo es estimar la importancia de ciertos conceptos (GCP o puntos de apoyo, en este caso) en el procesamiento de imágenes.

Se ha de comentar que, para poder llevar a cabo la metodología de trabajo (sobre todo el apartado de la recogida de datos de campo) se trabaja en colaboración con la empresa Fuvex Civil SL, la cual se dedica al desarrollo de UAV de largo alcance. Gracias al proyecto en el que se estima el estado de la red eléctrica en la zona de estudio y, donde colaboran esta entidad y la empresa Naturgy, se realiza este proyecto.

## 2. Antecedentes

### 2.1. Fotogrametría

Aunque la historia de la fotogrametría se puede indicar que comenzó el año 1858, la obtención de la primera imagen digital a través de una fotografía aérea supuso un punto de inflexión en ella; ya que, se logró evitar el proceso de escaneo de las imágenes analógicas (Pérez, 2005). Este avance abrió un gran abanico de posibilidades dentro de la fotogrametría moderna, donde el objetivo principal se centra en la creación de productos en 3 dimensiones aplicando la visión estereoscópica en imágenes de 2 dimensiones (Burnham, 2019).

Otro avance esencial en este ámbito fue la creación de los sistemas de navegación GNSS (*Global Navigation Satellite System*) los cuales sirven para determinar el posicionamiento y localización (coordenadas X, Y, Z) de elementos mediante la recepción de señales satelitales (Volakis, O'Brien & Chen, 2016). Esta información se muestra en segundos o Hz y se recoge con una frecuencia variable (1-5Hz comúnmente). Sin embargo, en algunos casos, puede mostrar problemas relacionados con la pérdida de la señal del satélite, por lo que no se pueden conseguir los datos de posicionamiento con la precisión necesaria (Koshaev, 2015).

Para dar solución a ese problema, se introdujeron los sensores de navegación inercial, también conocidos como INS (*Inertial Navigation System*). Estos sistemas son capaces de capturar las posiciones precisas de cada punto y, además, también brindan información sobre los ángulos de rotación (omega, phi, kappa) a lo largo de toda la trayectoria (Rizaldy & Firdaus, 2012). De la misma manera, trabajan de forma autónoma (no dependen de ningún satélite) y pueden captar datos a mucha mayor frecuencia (200 Hz) en comparación con los GNSS. Por ello, no hay ninguna dificultad correspondiente a la pérdida de la señal, y además se consiguen datos de posicionamiento más precisos (Hackvello, Cannon & Lachapelle, 2003). Gran parte de este trabajo se le asigna a la unidad IMU (*Inertial Measurement Unit*), que es el componente capaz de medir la velocidad, la orientación y las fuerzas gravitacionales a lo largo de toda la trayectoria de vuelo (Hosseinyalamdary, 2018).

Los dos sistemas de navegación mencionados anteriormente se incorporan a los vehículos aéreos no tripulados (ver figura 1), y mediante esta unión, se consigue llevar a cabo múltiples estudios topográficos (Hackl et al., 2017 y Bi et al., 2016). Por si fuera poco, además de la topografía, hay una gran variedad de campos que trabajan simultáneamente con todos los elementos, por lo que también han sido utilizados en proyectos relacionados con la construcción (Jeong et al., 2019 y Shashi & Jain, 2007) o con el mapeo de árboles (Kwong & Fung, 2020) y bosques (Žihlavník, Chudý & Kardoš, 2007).

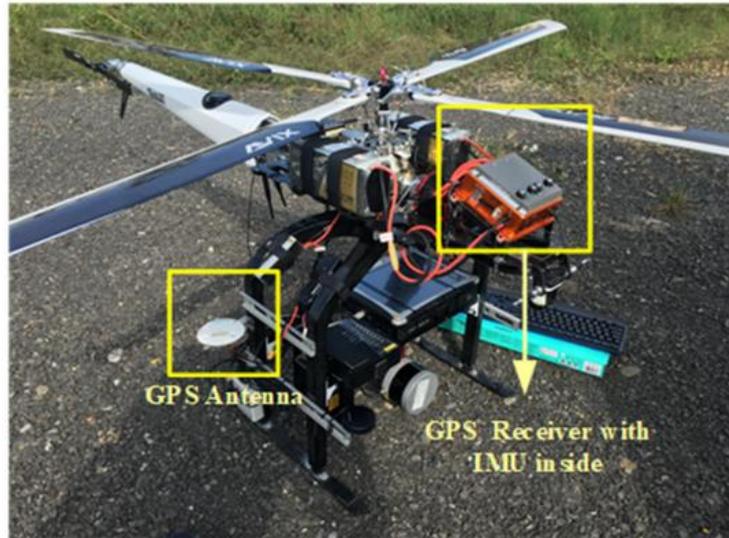


Figura 1: Sistemas GNSS e INS incorporados en un UAV. Fuente: Sun et al., 2020.

Para poder entender los procesos fotogramétricos llevados a cabo en este proyecto, es fundamental tener clara la definición de algunos conceptos clave. Entre ellos, destacaría el término de GSD (*Ground Sample Distance*), dado que es uno de los parámetros más relevantes a la hora de realizar cualquier proceso fotogramétrico (Felipe, Hernández & Lerma, 2012). Esta distancia representa el tamaño del píxel sobre el terreno, por lo que se define como la distancia entre los centros de píxeles vecinos medidos en el suelo, y depende de la altura de vuelo y del sensor empleado (Lee & Sull, 2019). Por lo tanto, mediante el GSD se estima el tamaño del píxel sobre el terreno partiendo del tamaño del píxel sobre la imagen (ver figura 2).

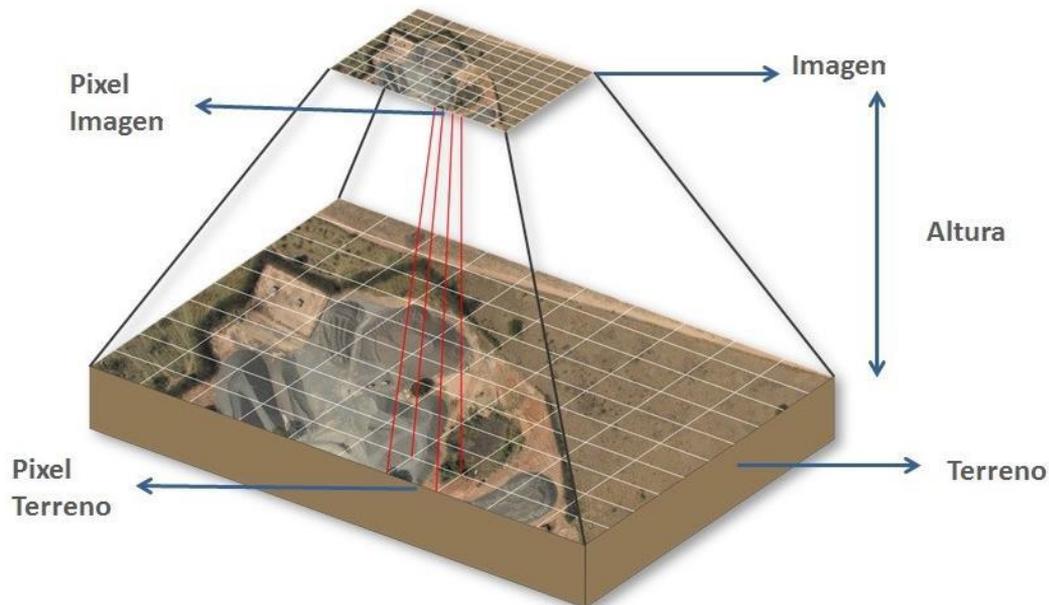


Figura 2: Relación entre el tamaño de píxel sobre el terreno y sobre la imagen. Fuente: Granados, 2019.

Estrechamente relacionado con este término, otro de los aspectos esenciales en la fotogrametría son los distintos tipos de resoluciones (Bemis et al, 2014). Entre estos, se encuentran la resolución espacial (que hace referencia al tamaño del píxel en escala del terreno), la espectral (número y anchos de banda), la radiométrica (número de niveles captados por el sensor) y la temporal (indica la periodicidad con la que se capturan las imágenes) (UNCPBA, 2012).

Otro de los conceptos básicos relacionado con este ámbito es el de los puntos homólogos, que se refiere a aquellos que se identifican en una imagen y que también son representados en otras (Santamaría & Sanz, 2011). De esta forma, se determinan zonas comunes en dos o varias imágenes (ver figura 3), y partiendo de esa base se pueden adquirir diferentes tipos de productos de la zona de interés (Karwel & Ewiak, 2008).

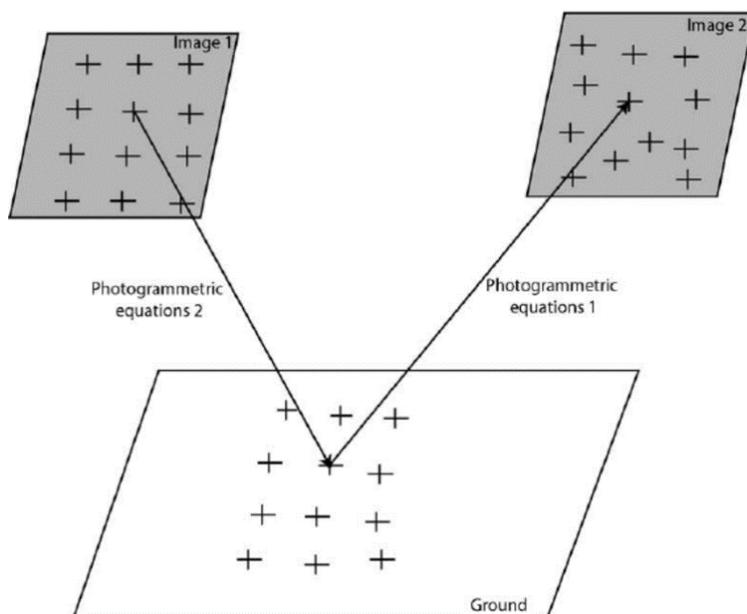


Figura 3: Puntos homólogos existentes entre dos imágenes. Fuente: Casson et al., 2002.

En este marco, también se ha de recalcar la importancia de los puntos de apoyo o GCP (del acrónimo *Ground Control Points* en inglés). Gracias a ellos, se saben las coordenadas precisas de ciertos puntos en la zona de estudio, y basándose en ellos, se pretende conseguir resultados donde la ubicación sea lo más precisa posible. Del mismo modo que ocurría con los puntos homólogos, el correcto posicionamiento de los GCP es fundamental para la obtención de los productos deseados (Sanz-Ablanedo et al, 2018).

Los dos conceptos anteriormente mencionados, puntos homólogos y GCP, pertenecen al proceso de la aerotriangulación. Este se presenta como una de las fases más importantes de la fotogrametría digital, donde el objetivo principal es determinar las coordenadas X, Y, Z de las imágenes a analizar. A su vez, también se pretende estimar los ángulos de rotación (Omega, Phi, Kappa) a lo largo de la trayectoria de vuelo (Tao & Lei, 2011). Dentro de este proceso, se distinguen dos tipos de orientaciones; la interna, por un lado, y la externa (suma de la orientación relativa y la absoluta) por otro.

La orientación interna hace referencia a calibrar debidamente los parámetros (distancia focal, tamaño de píxel o coordenadas en la imagen, por ejemplo) del sensor. En definitiva, se describen las características de la cámara con la que se captan las imágenes (Debiasi & Mitishita, 2013). Acto seguido, se lleva a cabo la orientación relativa, donde se pretende pasar de las fotocoordenadas de las imágenes a las coordenadas del modelo y orientarlas relativamente mediante los puntos homólogos o puntos de enlace (Elamin, 2013). Por último, en la orientación absoluta el objetivo principal es obtener coordenadas del terreno a partir de las coordenadas del modelo, empleando para ello la ubicación de los puntos de apoyo (Yan et al., 2016).

Al finalizar el proceso de aerotriangulación (ver anexo 1) se consigue un modelo que contiene coordenadas del terreno de los puntos que lo forman. A partir de este, y utilizando diferentes tipos de procesos fotogramétricos, se construyen productos de gran precisión como Modelos Digitales de Elevaciones (Polat & Uysal, 2017), Modelos Digitales de Superficies (Stal et al., 2011), modelos 3D (Comba et al., 2018) y ortofotos (Wierzbicki, Kedzierski & Fryskowska, 2015). Tal y como se ha comentado anteriormente, en este proyecto también se pretende adquirir

los productos recientemente mencionados; sin embargo, en este caso se construye un ortomosaico en lugar de una ortofoto. Aunque ambos productos son muy similares, para obtener el segundo se necesita saber con la mayor precisión posible todos los parámetros de la cámara empleada. Dado que esta información no está en su totalidad accesible al público, se construirá un ortomosaico.

## 2.2. Teledetección LiDAR

Como en el caso de la fotogrametría, en los años recientes ha habido un considerable aumento de proyectos o investigaciones relacionados con la teledetección LiDAR. Esta tecnología se basa en la emisión de pulsos láser que después de rebotar sobre una superficie regresan al receptor. De esta manera, se estima la distancia entre la superficie y el sensor basándose en el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso en cuestión (Coromines, Blanco & Ruiz, 2005). Por si eso fuera poco, también se es capaz de recibir datos de intensidad de las superficies con las que se interactúa. Este parámetro es de gran interés debido a que depende principalmente de la reflectancia de las superficies; y aunque hay varios factores que limitan su uso, puede ser fundamental a la hora de llevar a cabo la clasificación de una nube de puntos (Jutzi & Gross, 2009).

Además de la ubicación y datos de intensidad de los puntos, esta tecnología es capaz de capturar varios retornos por cada pulso emitido. Esto se debe a la emisión del láser en forma de haz, lo que provoca que los pulsos incidan con un área de superficie, y no con un único punto. Aunque antiguamente los sistemas solo eran capaces de detectar un único retorno, gracias a los avances realizados en los recientes años, en este momento se es capaz de trabajar con un número mucho mayor (Li et al., 2020). Este hecho es de gran interés a la hora de realizar investigaciones en zonas boscosas, ya que, visualizando el número de pulsos de retorno, se consigue identificar los diferentes elementos (copa de un árbol o superficie, por ejemplo) que forman el bosque (Evans et al., 2009).

Otro de los beneficios a recalcar que ofrece esta tecnología es que se trata de sensores activos; es decir, el mismo sensor emite pulsos electromagnéticos y recibe el eco reflejado después de que este interactúe con algún tipo de superficie (ver figura 4). Gracias a ello, se puede controlar la longitud de onda que utilizan y se evita la dependencia en la luz solar para tomar datos. De esta manera, se podrá capturar información de manera continua para posteriormente procesar esos datos y poder obtener productos de alta calidad y mayor precisión (Renslow, Greenfield & Guay, 2000). En definitiva, se recogen tres tipos de datos después de cada vuelo: Coordenadas precisas de cada punto y ángulos de rotación, datos de intensidad de las superficies con las que interactúa el láser y el número de pulsos de retorno.

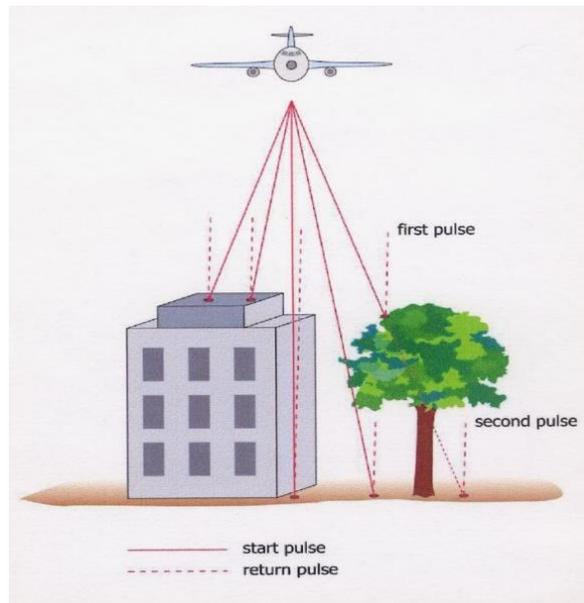


Figura 4: Pulsos emitidos y de retorno en la tecnología LiDAR. Fuente: Marinebiotech, 2020.

Toda esta información es utilizada para la clasificación de puntos, donde el objetivo principal es la correcta separación de aquellos que corresponden a diferentes tipos de superficies (Niemeyer, Rottensteiner & Soergel, 2014). En la mayoría de algoritmos que pretenden ejecutar dicha tarea, uno de los fines principales es clasificar debidamente los puntos de suelo; puesto que de esta manera se consigue crear dos grandes grupos (puntos de suelo y los que no se agrupan en esa clase) en la nube a clasificar (Chen et al., 2017). Para ello, es posible emplear una gran cantidad de algoritmos; entre ellos se podrían mencionar la clasificación mediante la curvatura multiescala (Tinkham et al., 2011), el algoritmo DATMO (Magnier, Gruyer & Godelle, 2017) o la red neuronal convolucional (CNN) (Wang et al., 2020).

Además de la correcta clasificación de los puntos de suelo, en muchas ocasiones también se pretende identificar elementos como carriles (Wu, Xu & Zheng, 2017) o líneas eléctricas de alta tensión (Qin et al., 2017). Se ha recalcar que no es tarea sencilla clasificar debidamente los puntos, ya que muchas veces los algoritmos empleados muestran limitaciones. Por ejemplo, se ha visto que puede haber desaciertos en la distinción de diferentes elementos en zonas boscosas (Dalponte, Bruzzone & Gianelle, 2008); o también se ha comprobado que la correcta clasificación de las superficies acuosas de baja profundidad presenta mayor dificultad (Smeeckaert et al., 2013).

Después de haber realizado la clasificación, y de la misma manera que ocurre en la fotogrametría, uno de los objetivos principales en el procesamiento de datos LiDAR es la obtención de productos de alta precisión como el Modelo Digital del Terreno (MDT) (Chen, Gao & Devereux, 2016) o el Modelo Digital de Superficies (MDS) (Gašparović et al., 2017). El primero se refiere a las elevaciones del terreno y de las superficies acuosas. En él, no se consideran ni los elementos naturales (vegetación, por ejemplo) ni los antrópicos (edificios, por ejemplo). Sin embargo, el MDS hace referencia a la elevación de toda la superficie (incluyendo elementos anteriormente mencionados) sobre el nivel del mar (Ormeño, 2004). Mediante la resta de estos dos productos (MDS-MDT) se obtiene el Modelo sobre Alturas de Suelo (CHM).

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado, es visible que la tecnología LiDAR es utilizada en una gran cantidad de campos de trabajo. Su presencia es especialmente importante en investigaciones topográficas, donde uno de los objetivos principales suele ser la obtención de los productos anteriormente mencionados

(Polat & Uysal, 2015). Sin embargo, también puede ser empleada para el mapeo y monitoreo de zonas vegetales (Ussyshkin & Theriault, 2011), de ecosistemas enteros (Davies & Asner, 2014) o para medir los efectos del calentamiento global en zonas glaciares (Avian, Kellerer-Pirklbauer & Bauer, 2009).

Muchas de estas investigaciones se llevan a cabo a partir de datos recogidos por un vuelo UAV donde posteriormente la información es procesada mediante las técnicas englobadas bajo el término *Airborne Laser Scanning (ALS)*. Dentro de estas, destacan los nuevos sensores que trabajan con sistemas de escaneo láser de forma de onda completa (*full-waveform laser scanning systems*). A causa de estos, se digitaliza la forma de la onda de cada pulso retrodispersado; lo que permite al usuario una mejor interpretación de las mediciones (Mallet & Bretar, 2009). Usando este tipo de técnicas, es posible extraer información detallada de la cubierta vegetal en zonas boscosas (Reutebuch, Andersen & McGaughey, 2005).

En este proyecto se utilizan sobre todo dos tipos de formatos en el procesamiento de datos LiDAR. El primero de ellos corresponde a archivos RINEX (*Receiver Independent Exchange*) donde se almacena de manera estandarizada las medidas recogidas por el sistema GNSS en las constelaciones que se trabaje (GPS y GLONASS, en este caso). Este tipo de formato fue introducido en el año 1989 con el objetivo de presentar un tipo de archivo capaz de mostrar con claridad los datos captados por cualquier sistema de posicionamiento (Gurtner & Estey, 2007).

A su vez, el formato LAS es esencial a la hora de realizar cualquier tipo de operación con datos LiDAR. Se trata de un formato estándar desarrollado por ASPRS (*American Society for Photogrammetry & Remote Sensing*) con carácter binario (lo que evita el excesivo volumen de archivos) que pretende evitar la abundancia de formatos comerciales (ASPRS, 2019). Asimismo, también es capaz de almacenar información relacionada con cualquier tipo de nube de puntos. Por todo ello, en los años recientes se ha convertido en el formato por excelencia en el procesamiento de nubes de puntos (ASPRS, 2019).

Actualmente, la última versión es la LAS1.4, la cual fue aprobada y presentada el año 2011. Sin embargo, ha habido varias revisiones posteriores que han mejorado esa primera versión, por lo que a día de hoy la última revisión (la número 15) es de 2019. Aun así, se ha de comentar que las versiones anteriores a la LAS1.4 son ampliamente utilizadas hoy en día (ASPRS, 2019).

El formato LAS1.4 contiene los siguientes datos (ver tabla 1): Por un lado, en la cabecera (*public header block header*), se muestra la información básica del fichero como pueden ser el número de puntos o las coordenadas de la zona. Por otro, en los registros de longitud variable (VLR) se muestra información relacionada con los metadatos y con la proyección empleada. Además, en los registros de la nube de puntos (PDR) se presenta la información de los atributos de cada punto. En consecuencia, suele ser el apartado de mayor relevancia de cara al usuario. Por último, los registros de longitud variable extendido son muy similares a los VLR, y como estos, son opcionales.

Tabla 1: Información disponible en la versión LAS1.4. Fuente: ASPRS, 2019.

<i>Public Header Block</i>
<i>Variable Length Records (VLRs)</i>
<i>Point Data Records</i>
<i>Extended Variable Length Records (EVLRS)</i>

Aunque el formato sea binario, estos archivos pueden llegar a tener mucha información dependiendo de la densidad de puntos y la extensión de la zona geográfica que contengan. Para solventar el problema, la empresa Rapidlasso (propiedad de Martin Isenburg) creó el formato comprimido denominado LAZ (Isenburg, 2013). Este es un formato de comprensión de datos que no reduce ni la calidad ni la precisión de datos.

Además, comparte características con el formato LAS, de manera que es totalmente público y ya ha sido aceptado por diferentes tipos de fabricantes e instituciones. Para la conversión de LAS a LAZ se pueden emplear las herramientas que engloba *LASzip*, que se presenta como el conjunto de técnicas capaces de comprimir los archivos sin pérdida de información (Isenburg, 2013).

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. Área de estudio

La zona de interés (ver figura 5) se ubica entre tres torres de alta tensión que se sitúan en la parte más noroeste de las demarcaciones del municipio de Funes (Navarra) (ver anexo 2). Se ha de comentar, que también se ubica en los alrededores del parque eólico de Caluengo y cubre aproximadamente 2Ha, con coordenadas límite en UTM de -1.85115, 42.32023 (esquina inferior derecha) y -1.84795, 42.32275 esquina superior derecha. Esta información se ha podido extraer visualizando la zona de estudio en QGIS y estimando el área que ocupa.

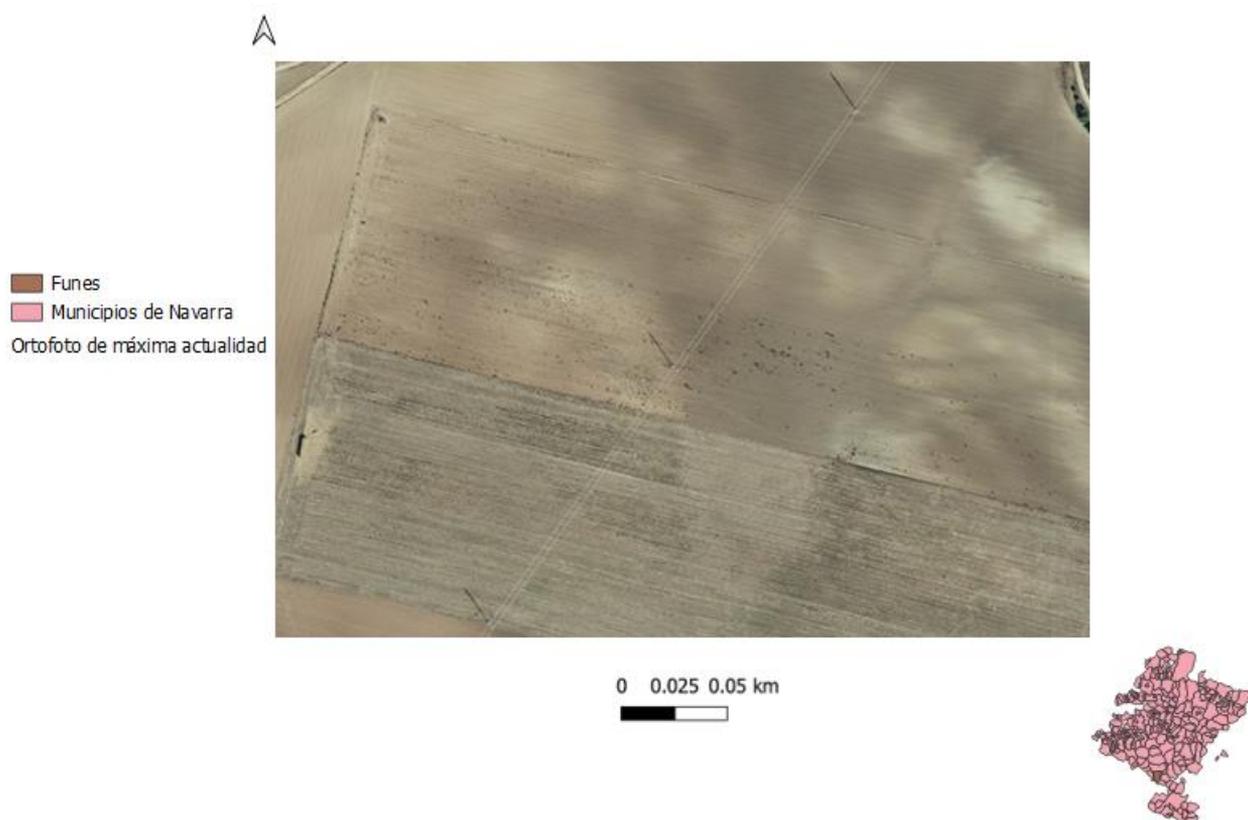


Figura 5: Ortofotografía de máxima actualidad de la zona de interés. Fuente: IDENA.

Aunque en la figura anterior no se pueda estimar con exactitud el tipo de superficie, después de consultar la capa de ocupación de suelo de la Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (IDENA), se sabe que en la zona se sitúan cultivos herbáceos secanos, donde resalta la presencia del trigo.

Visualizando el Modelo Digital del Terreno de 2017 (con una resolución de 50cm) provisto por la cartoteca de Navarra, se determina que la altura ortométrica del terreno es de entorno a 400m. Además, después de descargar la capa de pendientes de IDENA se sabe que las zonas llanas (pendiente de menos del 3%) y con pendiente suave (3-10% de pendiente) ocupan la mayor parte del área.

Por otra parte, se sitúa dentro del clima mediterráneo continental, por lo que en verano predominan las altas temperaturas (entorno a los 30°C) y la escasez de precipitaciones. Sin embargo, en invierno son comunes temperaturas que rondan los 2°C. Es importante considerar esta información climatológica, ya que ayuda a prever el tipo de cultivo que puede predominar dentro de la zona de estudio.

### 3.2. Material de partida

#### 3.2.1. Fotogrametría

Para la captura de imágenes se utiliza una aeronave multirrotor provista por la empresa Fuvex (ver figura 6). Se trata de un dron que consta de 4 hélices, donde en cada una de ellas se coloca un pequeño motor. Además, se tiene la opción de volar de forma autónoma; y por si eso fuera poco, también se puede cambiar el tipo de sensor (RGB, multispectral etc.) para poder recolectar la información de interés. Asimismo, goza de una autonomía de en torno a 30-60mins y actualmente está autorizado para volar en un radio de 10km.



Figura 6: Aeronave empleada para la captura de imágenes. Fuentes: Elaboración propia.

Cabe comentar que en la aeronave también se colocan tanto el sistema GNSS como el sistema de navegación inercial. Aunque las características esenciales y la información recogida por ambos sean diferentes, lo cierto es que en la mayoría de ocasiones se emplea una aeronave que incluye ambos componentes (Chu et al., 2012 y Stebler et al., 2011). Además, se combina la información que ambos sistemas recogen con los datos conseguidos desde la estación GNSS ubicada en San Adrián (Navarra), cuya extensión corresponde a un archivo RINEX de versión 2.11. Se ha de recalcar que esta información es proporcionada por Red de Geodesia Activa de Navarra (RGAN). Asimismo, la cámara empleada para el vuelo es una Sony ILCE-6000, cuyas características son las siguientes (ver tabla 2).

Tabla 2: Ficha técnica del sensor Sony ILCE-6000. Fuente: Sony.

Tipo de sensor	Tipo APS-C (23,5 x 13,6mm)
Número de píxeles (efectivos)	24,3MP
Número de píxeles (total)	Aprox 24,7MP
Relación de aspecto del sensor de imagen	3:2
Tamaño de píxel en sensor (mm)	0,004 x 0,004mm
Distancia focal (mm)	16mm

Utilizando el equipo anteriormente mencionado se captaron 114 imágenes georreferenciadas el día 30 de marzo de 2021. Todas ellas pertenecen al vuelo de ida y se voló a una altura de 60m con un solape del 40%

entre imágenes. En los dos proyectos que se presentan a continuación se trabaja con las mismas imágenes de partida.

Por último, como se acaba de comentar, se presentan dos proyectos diferentes que corresponden a la misma zona de estudio. La diferencia entre ambos es que en uno de ellos no se emplea ningún punto de apoyo, por lo que la cantidad de productos obtenidos es menor que en el segundo. Sin embargo, en este se colocan tres GCP, uno por cada torre que se encuentra dentro de la zona. Para la ubicación de estos, se emplean el MDT y ortofotografía de máxima actualidad (2020) provistos por IDENA, al igual que el sistema de información geográfica de *Google Earth*.

Cabe destacar que la correcta ubicación de los puntos es un procedimiento difícil de llevar a cabo por diferentes razones: En primer lugar, no se colocaron elementos distinguibles con coordenadas concretas (que sirvieran como puntos de apoyo) en el momento en el que se voló la zona. Además, al ser un terreno tan homogéneo, la identificación de objetos diferenciables para la colocación de los puntos es de gran complejidad. Por ello, se opta por ubicar un punto por cada torre (ver tabla 3), ya que es la única forma de obtener coordenadas de puntos concretos presentes en las imágenes.

Tabla 3: Ubicación de los puntos de apoyo en el sistema WGS84.

ID	Longitud	Latitud	Altitud (m)
1	-1.850533	42.320650	395
2	-1.848934	42.322234	398
3	-1.847389	42.323808	403

### 3.2.2. Teledetección LiDAR

Para la captura de datos LiDAR se voló el día 17 de mayo de 2021 empleando una aeronave provista por la empresa Fuvex muy similar a la mencionada en el anterior apartado. Sin embargo, en este caso se trabaja con un sistema multirrotor de 6 hélices (ver figura 7), lo que aumenta tanto la autonomía como el rendimiento de vuelo.



Figura 7: Aeronave empleada para la captura de datos LiDAR. Fuente: Elaboración propia.

También se voló con los dos sistemas de navegación mencionados anteriormente, y se complementan estos datos con la información obtenida de la estación GNSS de San Adrián. Además, se trabaja con un sistema LiDAR g-AirHawk GS-100M (ver figura 8) proporcionada por la empresa Geosun y cuyas propiedades son las

siguientes (ver tabla 4). Asimismo, las características de vuelo (por ejemplo, la altura) son muy similares a las explicadas en el apartado anterior.

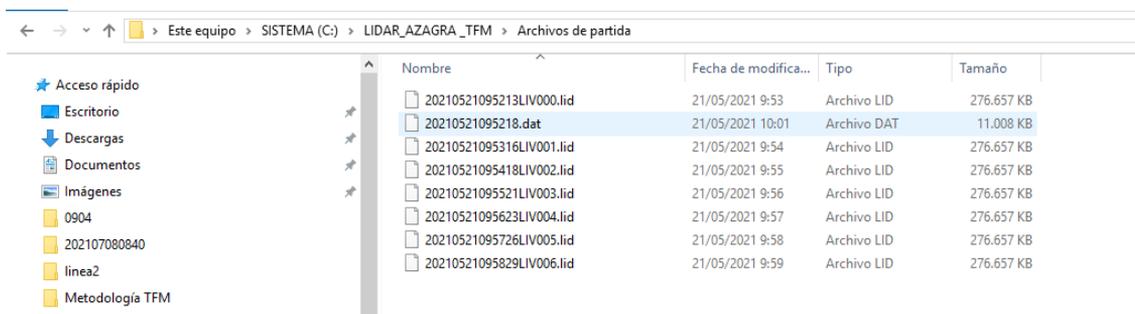


Figura 8: Sistema LiDAR empleado para la captura de datos. Fuente: Geosun.

Tabla 4: Ficha técnica de la unidad LiDAR y la unidad POS del sistema g-AirHawk GS-100M. Fuente: Geosun.

Unidad LiDAR	Rango de medición	Reflectividad 190m@10%, Reflectividad 260m@20%, Reflectividad 450m@80%
	Clase de láser	905nm Clase1 (IEC 60825-1:2014)
	Rango máx	450 m
	Rango mín	0.3 m
	Precisión de rango	±5cm (@0.3m-1m) ±2cm(@1m-200m)
	Datos	Triple eco, 720,000 Puntos/Seg
	Campo de visión (FOV)	70° visión circular
	Frecuencia de actualización	200HZ
Unidad POS	Precisión de heading	0.08°
	Precisión de pitch	0.025°
	Precisión de roll	0.025°
	Precisión de posición	0.02 - 0.05m
	Tipo de señal GNSS	GPSL1/L2 GLONASSL1/L2 BDS B1/B2a/B3
	Software POS	Información de salida: posición, velocidad y actitud de vuelo

Utilizando todo este equipo se capturan dos tipos de datos de partida (ver figura 9): El primero, corresponde a un fichero de extensión *.dat*, y a partir de este se consiguen todos los archivos necesarios para determinar la ubicación de cada punto. El segundo tipo de archivo almacena toda la información LiDAR adquirida durante la trayectoria de vuelo. En este proyecto, se obtienen 7 ficheros diferentes que corresponden a 3 líneas de vuelo.



Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
20210521095213LIV000.lid	21/05/2021 9:53	Archivo LID	276.657 KB
20210521095218.dat	21/05/2021 10:01	Archivo DAT	11.008 KB
20210521095316LIV001.lid	21/05/2021 9:54	Archivo LID	276.657 KB
20210521095418LIV002.lid	21/05/2021 9:55	Archivo LID	276.657 KB
20210521095521LIV003.lid	21/05/2021 9:56	Archivo LID	276.657 KB
20210521095623LIV004.lid	21/05/2021 9:57	Archivo LID	276.657 KB
20210521095726LIV005.lid	21/05/2021 9:58	Archivo LID	276.657 KB
20210521095829LIV006.lid	21/05/2021 9:59	Archivo LID	276.657 KB

Figura 9: Archivos de partida del proyecto LiDAR.

### 3.3. Procesamiento fotogramétrico

El programa informático utilizado para el procesamiento de imágenes es *Agisoft Metashape* (versión 1.7.0 para 64 bits), el cual fue desarrollado por la empresa Agisoft y está especializado en el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y generación de datos espaciales en 3D (Agisoft, 2020). Por ello, permite generar productos como ortofotos, MDE y nubes de puntos. Además, se ha comprobado que muestra una gran precisión en las ubicaciones de los puntos de dichos resultados (Barbasiewicz, Widurski & Daliga, 2018).

Cabe comentar que la empresa propietaria no ha dado a conocer públicamente de forma expresa los algoritmos que se emplean para la construcción de cada uno de los resultados. Sin embargo, se sabe que, para poder empezar a trabajar, primero se buscan las características que coinciden en diferentes imágenes mediante los puntos de apoyo (Semyonov, 2011). Este proceso se lleva cabo con un algoritmo similar al SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) el cual permite extraer características relevantes de las imágenes, que posteriormente pueden usarse en reconocimiento de objetos o áreas (Lowe, 2004).

Además, al llevar a cabo la aerotriangulación, el programa se encarga de determinar la resolución de parámetros de orientación intrínsecos y extrínsecos de la cámara. Para ello, se emplean algoritmos similares a *Bundler*, en los cuales, introduciendo conjuntos de imágenes, sus características y las coincidencias entre ellas se es capaz de realizar una reconstrucción en 3 dimensiones (Turner, Lucieer & Watson, 2012).

Para la construcción de la nube densa de puntos, se emplea tanto un algoritmo por pares (*pairwise algorithm*) como otro de vista múltiple (*multi-view algorithm*). Por último, para la obtención del Modelo Digital del Terreno se emplean diferentes tipos de algoritmos de interpolación en los cuales se determina el valor de un punto desconocido a partir de los valores que tienen los puntos que están próximos a este.

Cabe comentar que además del software anteriormente mencionado también se emplean otros como *QGIS* (versión 3.10.14), *FugroViewer* (versión 3.3.) y *CloudCompare* (versión 2.12) para visualizar los resultados que se obtienen.

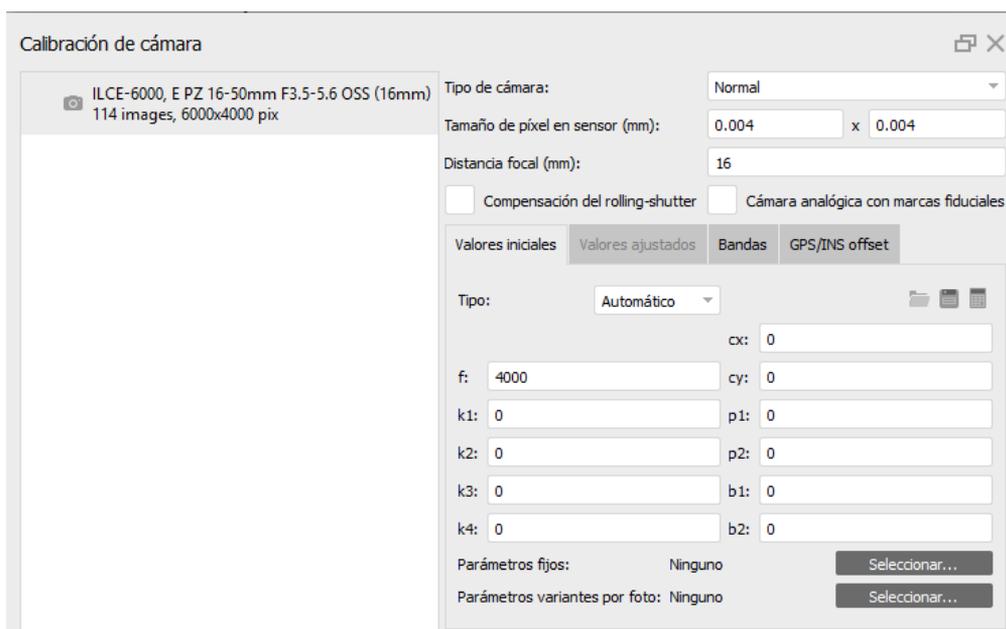
#### 3.3.1. Proyecto sin puntos de apoyo

En primer lugar, se importan todas las fotos adquiridas por la aeronave durante la trayectoria de vuelo. Para ello, se elige la opción “añadir fotos” (dentro de “flujo de trabajo”) y se eligen las imágenes de interés. Puesto que todas están georreferenciadas (en el sistema de coordenadas WGS84), se pueden visualizar las posiciones exactas de cada imagen (ver figura 10). Por ello, se afirma que llevan incorporada información de orientación directa. Este aspecto es de gran ayuda a la hora de realizar pasos posteriores (en la orientación relativa, por ejemplo), ya que se pueden considerar estos datos de referencia.

Cámaras	Longitud	Latitud	Altitud (m)	Precisión (m)
✓ DSC04694_geotag	-1.848299	42.323009	449.050000	10.000000
✓ DSC04695_geotag	-1.848330	42.322976	448.880000	10.000000
✓ DSC04696_geotag	-1.848372	42.322932	448.670103	10.000000
✓ DSC04697_geotag	-1.848372	42.322932	448.670103	10.000000
✓ DSC04698_geotag	-1.848413	42.322890	448.400000	10.000000
✓ DSC04699_geotag	-1.848463	42.322840	448.030000	10.000000
✓ DSC04700_geotag	-1.848519	42.322798	447.890000	10.000000
✓ DSC04701_geotag	-1.848519	42.322798	447.890000	10.000000
✓ DSC04702_geotag	-1.848547	42.322756	447.714286	10.000000
✓ DSC04703_geotag	-1.848581	42.322722	447.666667	10.000000
✓ DSC04704_geotag	-1.848622	42.322685	447.461538	10.000000

Figura 10: Datos de longitud, latitud, altitud y precisión estimada de las imágenes de partida

Después de la importación de todas las imágenes se lleva a cabo la orientación interna del sensor eligiendo la opción “calibración de la cámara”. En este proyecto, el programa es capaz de identificar la cámara (y sus características) con la que se han capturado las imágenes, por lo que determina automáticamente los parámetros de calibración (ver figura 11). Sin embargo, también cabría la opción de introducir manualmente toda esta información. Una vez visualizados los datos sobre el sensor, y cerciorar de que son correctos, se finaliza el proceso de la orientación interna.



Calibración de cámara

ILCE-6000, E PZ 16-50mm F3.5-5.6 OSS (16mm)  
114 images, 6000x4000 pix

Tipo de cámara: Normal

Tamaño de píxel en sensor (mm): 0.004 x 0.004

Distancia focal (mm): 16

Compensación del rolling-shutter  Cámara analógica con marcas fiduciales

Valores iniciales | Valores ajustados | Bandas | GPS/INS offset

Tipo: Automático

cx: 0

f: 4000 cy: 0

k1: 0 p1: 0

k2: 0 p2: 0

k3: 0 b1: 0

k4: 0 b2: 0

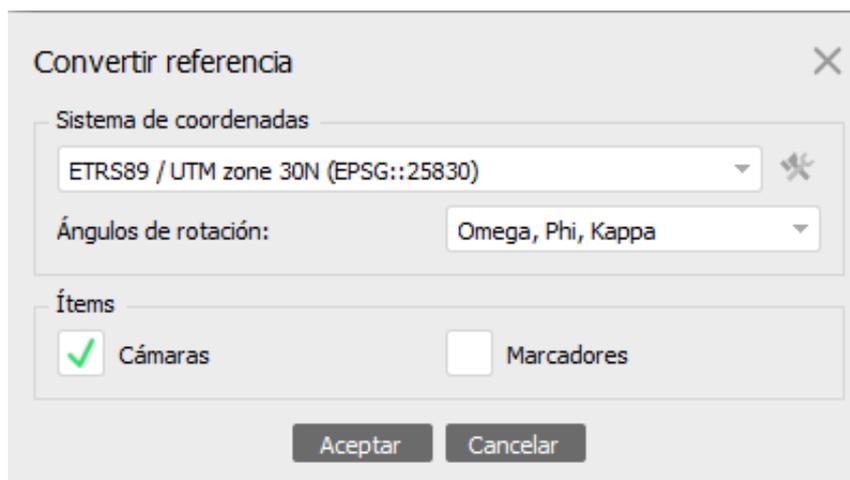
Parámetros fijos: Ninguno [Seleccionar...]

Parámetros variantes por foto: Ninguno [Seleccionar...]

Figura 11: Parámetros de calibración del sensor.

Acto seguido, se convierten los datos de las imágenes del sistema de coordenadas geográficas WGS84 (EPSG:4326) al sistema proyectado ETRS89/zona UTM30N (EPSG:25830). Este último se limita únicamente al continente europeo y, sin embargo, en el primero se contemplan las ubicaciones de todo el mundo. Por ello, se espera que la precisión y exactitud de los pasos posteriores aumente en la conversión de coordenadas.

También se determina que los ángulos a estimar en la orientación relativa son *omega*, *phi* y *kappa* (ver figura 12).



Convertir referencia

Sistema de coordenadas  
ETRS89 / UTM zone 30N (EPSG::25830)

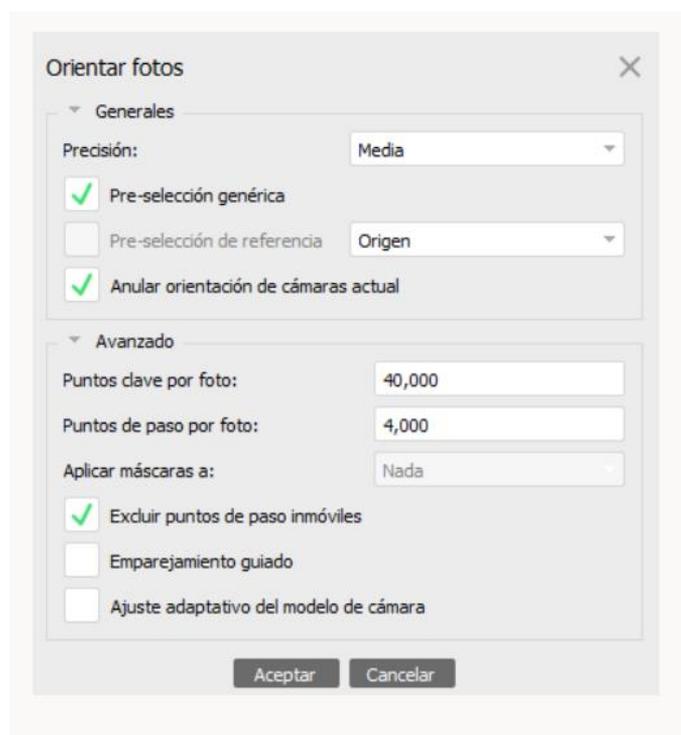
Ángulos de rotación: Omega, Phi, Kappa

Ítems  
 Cámaras  Marcadores

Aceptar Cancelar

Figura 12: Sistema de referencia y ángulos de rotación del proyecto.

Para pasar a la orientación relativa de las imágenes, se elige la opción “orientar fotos” donde se determina que la precisión debe ser “Media”. Se podría haber utilizado mayor precisión, pero el coste computacional y temporal en ese caso sería mucho mayor. Asimismo, se ha visto que la diferencia entre la precisión media, la alta y la óptima es poco relevante en la representación de los puntos sobre el suelo (Tinkham & Swayze, 2021). Además, también se marca la opción de “pre-selección de referencia”, puesto que se dispone de datos de orientación directa de las imágenes. Con esta opción, se logra optimizar el proceso de búsqueda de puntos homólogos. Por último, se determina que los puntos clave por foto sean de 40.000 y que los puntos de enlace por foto sean de 4000 (ver figura 13).



Orientar fotos

Generales

Precisión: Media

Pre-selección genérica  
 Pre-selección de referencia Origen  
 Anular orientación de cámaras actual

Avanzado

Puntos clave por foto: 40,000  
Puntos de paso por foto: 4,000  
Aplicar máscaras a: Nada

Excluir puntos de paso inmóviles  
 Emparejamiento guiado  
 Ajuste adaptativo del modelo de cámara

Aceptar Cancelar

Figura 13: Parámetros de orientación relativa.

Con este paso, se da por finalizado el proceso de orientación para este proyecto. Si se tuvieran las coordenadas exactas de ciertos puntos de apoyo (como sucede en el segundo proyecto) después de la orientación relativa se procedería a la absoluta. De esta manera, se podrían obtener coordenadas de terreno a partir de coordenadas de modelo, y se trabajaría en un sistema de coordenadas concreto. Pero como en este proyecto se carece de ese tipo de información, no se puede llevar a cabo dicho proceso.

En este momento, se empieza a generar los productos de interés, empezando por la nube densa de puntos, donde se representan millones de ellos posicionados relativamente. Dentro de la opción “flujo de trabajo” se elige la opción “nube densa de puntos” y dentro de los parámetros, se determina que la calidad debe ser “media” y que el filtrado en profundidad debe ser “leve” (ver figura 14).

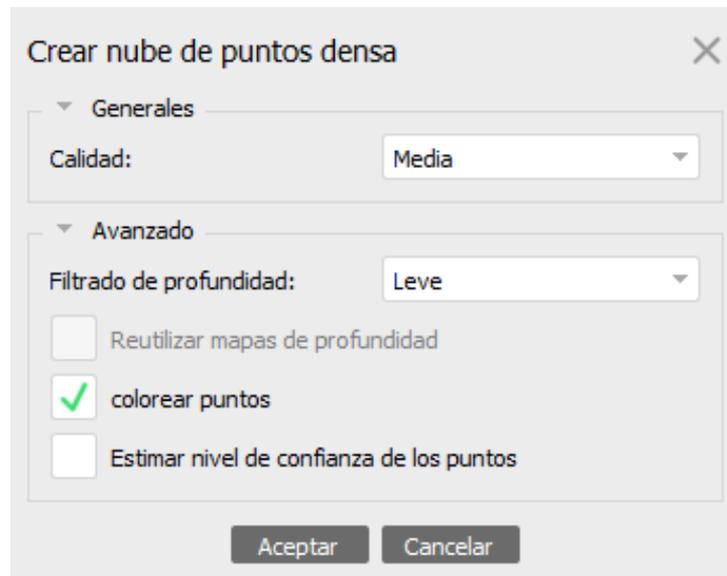


Figura 14: Configuración para la creación de la nube densa de puntos.

Acto seguido, se importa el producto que se acaba de construir a un archivo de extensión *.ply* para posteriormente poder visualizarlo en *CloudCompare*. Dicha importación también se podría haber realizado a un archivo con extensión *.las* que se podría haber visualizado utilizando el programa *FugroViewer*.

Finalmente, la generación del modelo 3D se obtiene a partir de la opción “crear malla” que se sitúa dentro de la herramienta “flujo de trabajo”. En este paso se determina que el producto se construya a partir de la nube densa de puntos y que también se represente en tres dimensiones (ver figura 15). Además, también se especifica que el número de caras sea alto, ya que, de esta manera, aumentará la calidad del producto sin añadir coste computacional. Tal y como se ha hecho con la nube de puntos, se exporta el modelo a un archivo de formato *.ply* para poder visualizarlo mejor en *CloudCompare*.

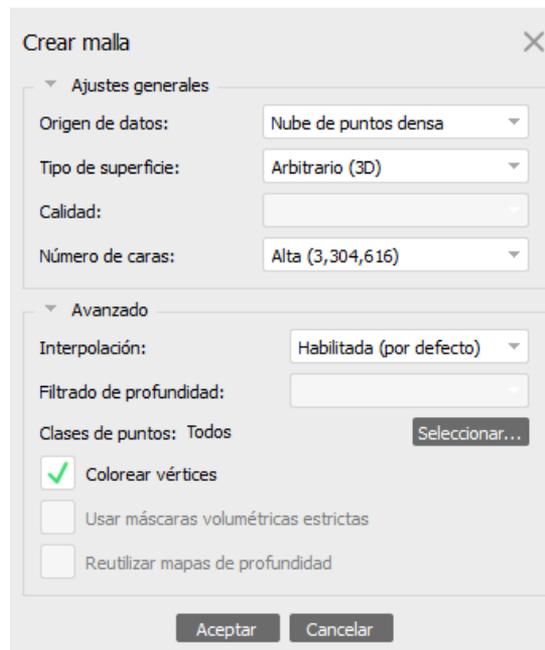


Figura 15: Configuración para la creación de la malla.

En el último paso, el objetivo principal será la obtención de un ortomosaico que represente la zona de estudio. Eligiendo la opción “crear ortomosaico” (dentro de “flujo de trabajo”) se introducen todos los parámetros a considerar (ver figura 16). Para ello, se toma como referencia la malla y se crea el producto en una proyección planar. Gracias a estos pasos, se ortorectifican todas las imágenes individuales y además se genera un mosaico construido a partir de cada una ellas.

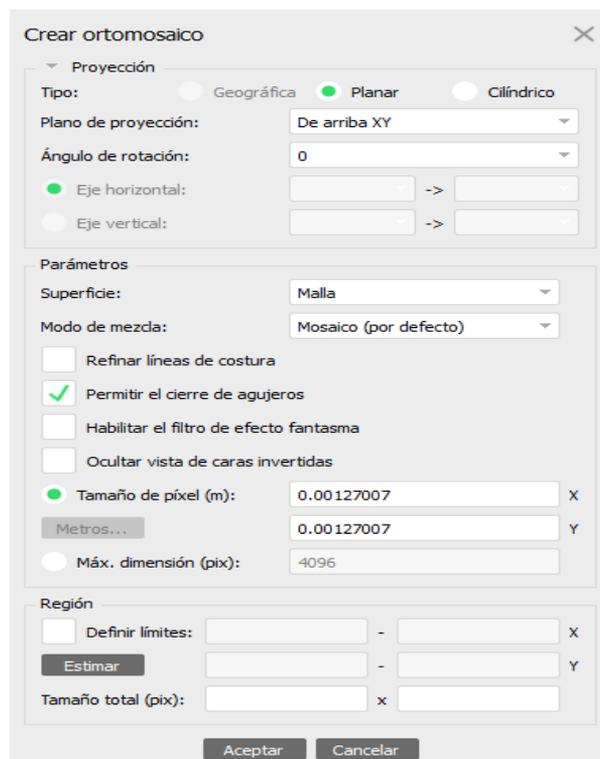


Figura 16: Configuración para la creación del ortomosaico.

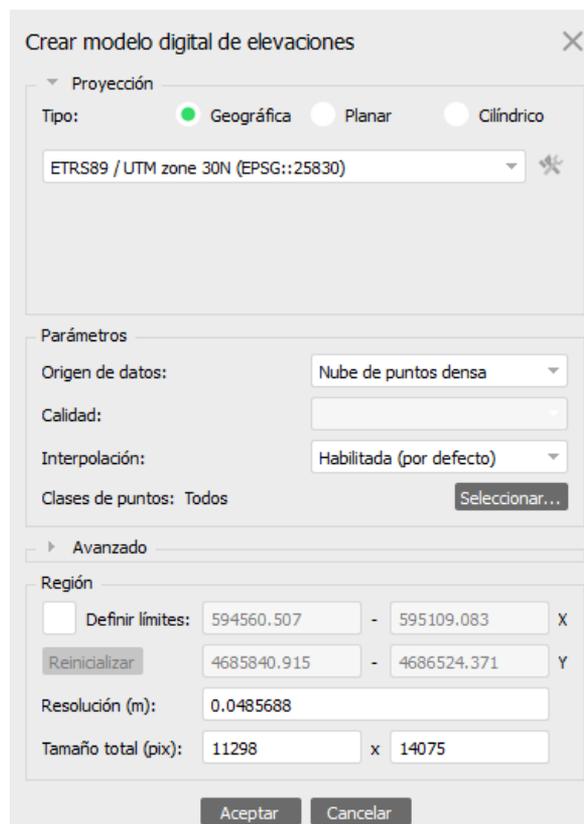
Después de haber conseguido el último resultado, se exporta un archivo TIF y se visualiza en *QGIS* junto con la ortofoto de máxima actualidad de IDENA. Mediante la comparación entre ambos, se puede comprobar la calidad y la precisión de lo construido.

### 3.3.2. Proyecto con puntos de apoyo

Se parte de las mismas imágenes empleadas en el primer proyecto y el procedimiento a realizar hasta la orientación relativa es exactamente el mismo al narrado anteriormente. En este punto, al ver que la caracterización y la posición de las torres son mejorables, se ubican varios puntos de apoyo a lo largo de la zona de estudio y se introducen en el proyecto importando un archivo ASCII que contiene dicha información.

Una vez importados todos los datos, se colocan los puntos manualmente en la mayor cantidad de imágenes posibles. De este modo, el programa es capaz de identificar y colocar cada punto de forma más exacta y con menor error. Por último, para terminar con el proceso de aerotriangulación, es conveniente convertir el sistema de coordenadas (tanto de los puntos de apoyo como de las imágenes) de WGS84 (EPSG:4326) a ETRS89/UTM zona 30N (EPSG:25830).

Para construir la nube densa de puntos y la malla (modelo 3D), se deben seguir los pasos descritos en el anterior proyecto. Acto seguido, aprovechando la información que brindan los puntos de apoyo, se construye el MDE. Para ello, se toma como referencia uno de los productos que se acaba de mencionar (en este caso, se emplea la nube densa de puntos) y, además, se especifica la proyección geográfica (ver figura 17).



*Figura 17: Configuración para la creación del MDE.*

Por último, para la creación del ortomosaico también se utiliza la herramienta mencionada en el anterior proyecto. Sin embargo, en este caso se determina la proyección geográfica con la que se trabaja y se especifica que el producto a considerar para la creación del ortomosaico sea el MDE (ver figura 18).

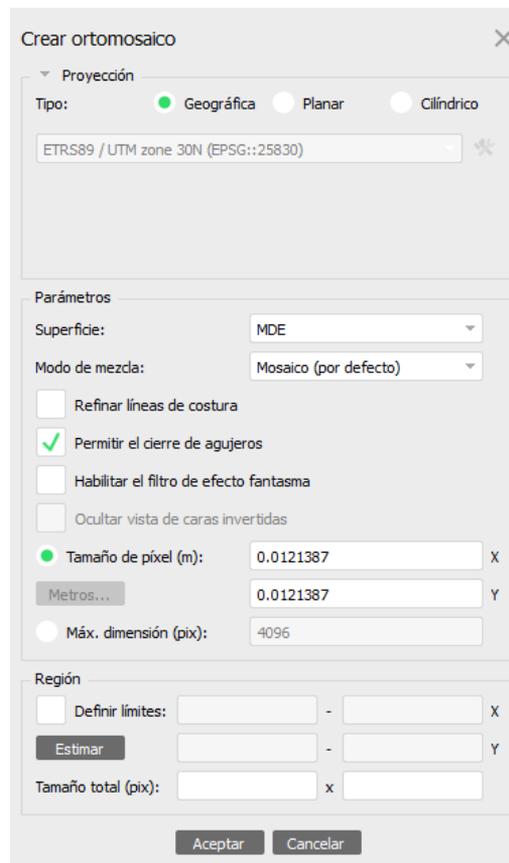


Figura 18: Configuración para la creación del ortomosaico.

De la misma manera que en el proyecto anterior, se utilizan los programas *QGIS* y *CloudCompare* para la visualización de todos los productos que se construyen a lo largo del proceso fotogramétrico.

Por último, se ha de comentar que además de los dos proyectos mostrados, se han realizado varias pruebas de diferentes características (alturas de vuelo, inclinación de cámara, modelo del sensor etc.) pero no se incluyen en este trabajo dado que los resultados obtenidos carecen de relevancia.

### 3.4. Procesamiento de datos LiDAR

En este apartado se describe con detalle todos los pasos a realizar para poder ejecutar el procesamiento de los datos LiDAR. En concreto, los productos de interés a construir son los siguientes: Un Modelo Digital del Terreno (MDT), un Modelo Digital de Superficies (MDS), el Modelo sobre Alturas de Suelo (CHM) y un modelo 3D.

Para ello, el primer software a utilizar es el denominado *Shuttle*. Se trata de un programa de pago que permite determinar el posicionamiento de alta precisión de los sistemas GNSS/INS. A su vez, es proporcionado por la empresa Geosun Navigation Technology Co, ubicada en Wuhan (China). Dentro del programa, el objetivo principal es obtener un documento ASCII donde se almacene toda la información relacionada con la ubicación precisa de los puntos que forman la trayectoria de vuelo. En este caso, se trabaja con la última versión de *Shuttle* (versión 5.8).

Acto seguido, se trabaja con el programa informático *g-AirHawk* (en su versión 4.5.02) que es provisto por la misma empresa. También es un software de pago cuyo objetivo es construir archivos LAS combinando la información obtenida en el programa anterior con la representación de las líneas de vuelo.

Después, se emplean el conjunto de herramientas y comando englobados en *LAStools* para la construcción de los productos de interés. Dentro de estos, se utilizan los siguientes:

- *Lasinfo*: Es el comando empleado para visualizar los metadatos o la información interna de cualquier archivo LAS. Se determina cuantos puntos almacena el archivo, el número de retornos, el número de puntos por cada categoría etc. Después de la ejecución de este comando, se crea automáticamente un documento ASCII donde son visibles todos estos datos.
- *Lasvalidate*: Permite validar de forma sencilla si el archivo seleccionado cumple con las especificaciones LAS impuestos por ASPRS. Se crea un archivo HTML que indica si hay algún tipo de norma que no se cumple.
- *Lasoverlap*: Mide el nivel de solapamiento y calcula la superposición entre diferentes archivos LiDAR y, a su vez, se estiman la alineación vertical y horizontal. Gracias a ello, se crea un archivo de salida que puede tener varios formatos (JPG o TIF, por ejemplo).
- *Lasmerge*: Fusiona diferentes archivos LAS en uno. En este caso, este comando se emplea para unir en un solo archivo las tres líneas de vuelo, para que de esta manera se pueda visualizar de forma más clara la zona de estudio. Además, cuando se trabaja con áreas extensas, permite dividirlos en subconjuntos más pequeños, cada uno de los cuales contiene un número de puntos especificado por el usuario.
- *Lasnoise*: Este comando identifica puntos aislados y los clasifica como “ruido” para posteriormente poder eliminarlos. Es importante mencionar que estos también pueden ser eliminados estableciendo valores mínimos o máximos en diferentes características (normalmente la intensidad) de la nube.
- *Lasgrid*: Se estiman los valores de un atributo seleccionado (la densidad de puntos y la elevación en este caso) con un tamaño de paso definido por el usuario empleando un método concreto (por ejemplo, mínimo, máximo, promedio). Se ha de comentar que es una herramienta que ofrece una gran versatilidad, ya que se puede trabajar con muchos atributos diferentes.
- *Lasground*: Básico para poder llevar a cabo cualquier clasificación en un archivo LiDAR, ya que se encarga de englobar todos los puntos de suelo en una sola categoría. Para ello, se basa en una variación del algoritmo red triángulos irregulares (TIN) presentado por Axelsson en el año 2000 (Axelsson, 2000).
- *Lasheight*: Después de la ejecución del comando anterior, mediante *lasheight* se estiman las alturas sobre el suelo de cada punto. Para ello, se basa en los puntos clasificados como suelo y mediante una red de triángulo irregulares se cuantifican todas las alturas.
- *Las2dem*: Esta herramienta emplea la triangulación de *Delaunay* para poder construir rásteres teniendo de referencia factores como la elevación o la intensidad.
- *Blast2dem*: Similar al anterior, pero se emplea cuando la nube de puntos es muy densa.
- *Las2txt*: Se trata de una herramienta de código abierto la cual permite convertir archivos LAS y LAZ a un formato de texto ASCII. En este son legibles por ejemplo las coordenadas, la intensidad y el tiempo GPS de cada punto.
- *Lasview*: Herramienta de visualización especializada en archivos LiDAR que permite editar la clasificación de los puntos, así como eliminarlos.
- *Lasboundary*: Lee y escanea cualquier archivo LiDAR para posteriormente poder estimar la zona geográfica que lo delimita.

Además, para la construcción del modelo 3D se emplea el lenguaje de programación *Python* en su versión 3.9. Se ha de recalcar que, a fin de ejecutar los comandos, se utiliza un documento de *Jupyter notebook* donde cabe la posibilidad de estructurar todo el script en celdas y de esta forma seguir un orden determinado. En este proyecto se ha de poner especial interés en las librerías *open3d* y *numpy*, ya que son las que permiten la generación del modelo en 3D.

Por último, para visualizar todos los resultados y mostrar información relevante sobre ellos se emplean los mismos programas utilizados en el apartado del procesamiento fotogramétrico.

### [3.4.1. Procesamiento de datos en Shuttle](#)

Una vez abierto el software, mediante la opción *Stream File Partition* (se encuentra dentro de *File*), se elige el archivo de partida con extensión *.dat*. Gracias a este primer paso, se obtienen 4 archivos que almacenan toda la información captada por los sistemas de navegación integrados en la aeronave.

Dentro de estos, son de interés especial los archivos KQS e IMU. El primero, brinda información sobre las posiciones obtenidas por el sistema GNSS durante toda la trayectoria de vuelo. A su vez, el segundo facilita el mismo tipo de información, pero para el sistema de navegación inercial. Los dos archivos restantes (cuyas extensiones son *Err.dat* y *.whs*) complementan la información de los sistemas de navegación.

Para asegurar que el día y la hora de vuelo son correctos, se puede convertir el archivo KQS en un archivo RINEX. Para ello, se emplea la opción *GNSS data code* y se elige el archivo de interés. Es importante determinar que en la conversión se debe obtener la versión 3.02 del formato RINEX en las constelaciones de interés (ver figura 19).

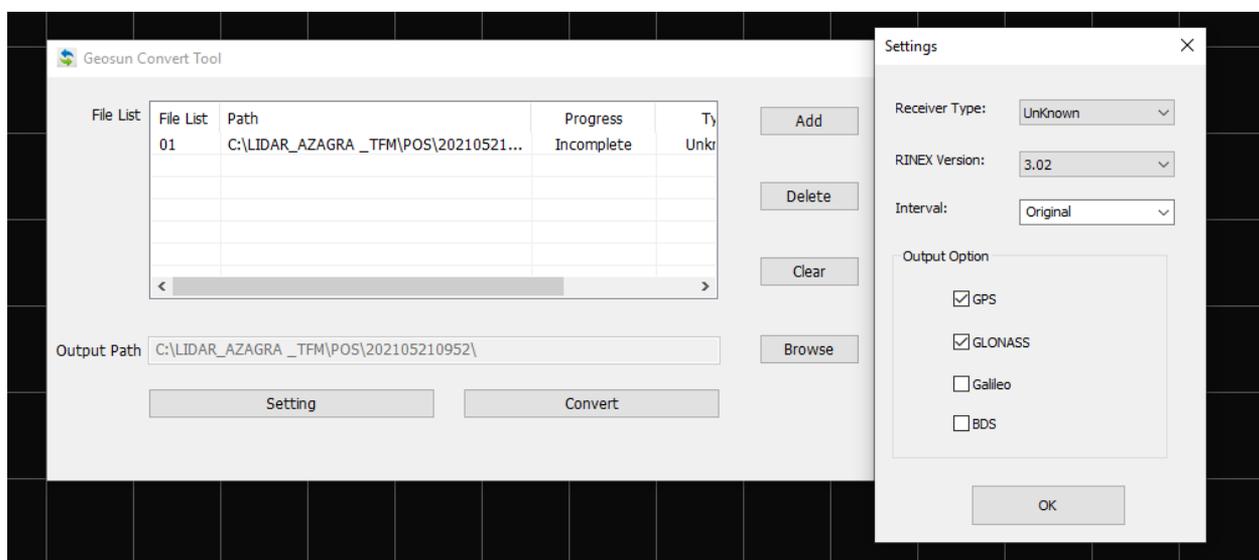


Figura 19: Parámetros para la conversión de formato KQS a RINEX.

Una vez llevado a cabo este paso y visualizando los datos que almacenan el archivo RINEX de la estación y del LiDAR (mediante el programa *Notepad++*, por ejemplo), se asegura de que el día, la hora y la versión de ambos coinciden. Este paso es vital para poder seguir con el procesamiento de los datos, ya que, si la información no coincide, no se podrá seguir trabajando.

Acto seguido, se abre un nuevo proyecto (denominado GNSS) donde el objetivo es obtener un bloc de notas con todas las posiciones adquiridas mediante el sistema GNSS. Para ello, se deben introducir una serie de datos: Primero, se elige el archivo RINEX correspondiente a la base (descargado desde la página de RGAN) y se introduce su posición exacta (ver figura 20).

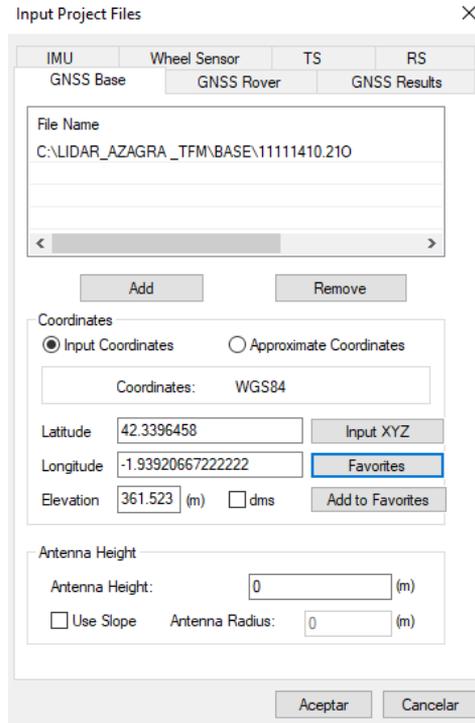


Figura 20: Información de la base para adquirir posiciones GNSS.

Después, se incorpora el archivo de extensión *.kqs* que corresponde al sistema LiDAR (ver figura 21). Acto seguido, se acepta la operación y se visualiza la trayectoria de vuelo realizada por la aeronave, donde todavía no se han almacenado las posiciones exactas de los puntos (ver figura 22).

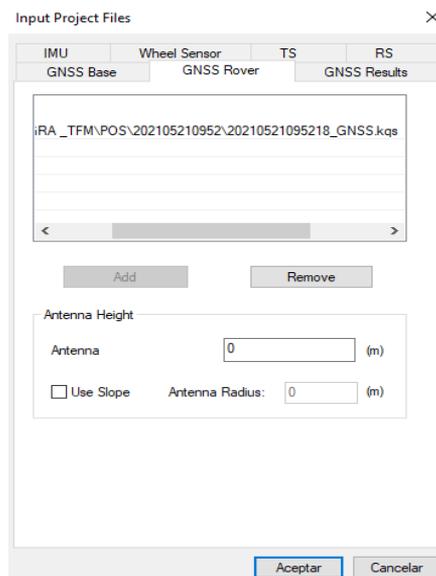


Figura 21: Información del sistema LiDAR para adquirir GNSS.

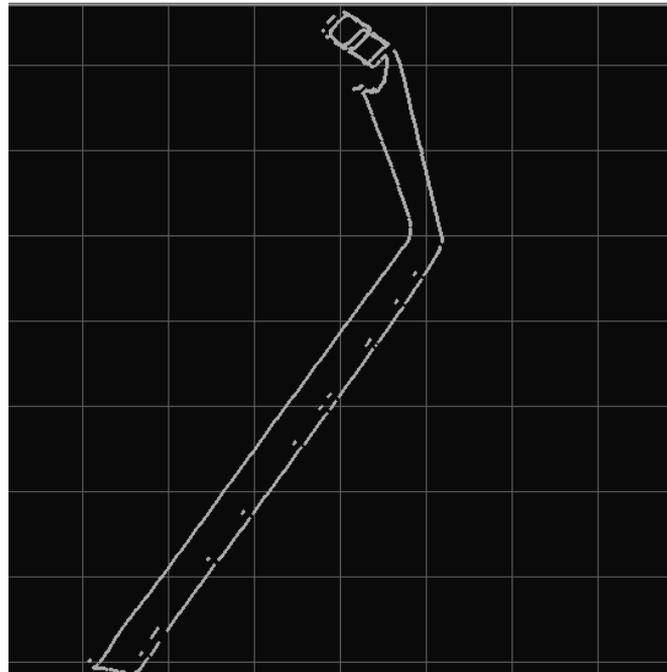


Figura 22: Trayectoria de vuelo visualizado en Shuttle.

El siguiente paso se centra en unir la trayectoria de vuelo con todas las posiciones almacenadas por el sistema GNSS. Para este fin, se elige la opción *Kinematic Differential GNSS*, donde se pueden visualizar las características de vuelo de cada punto del trayecto (ver figura 23).

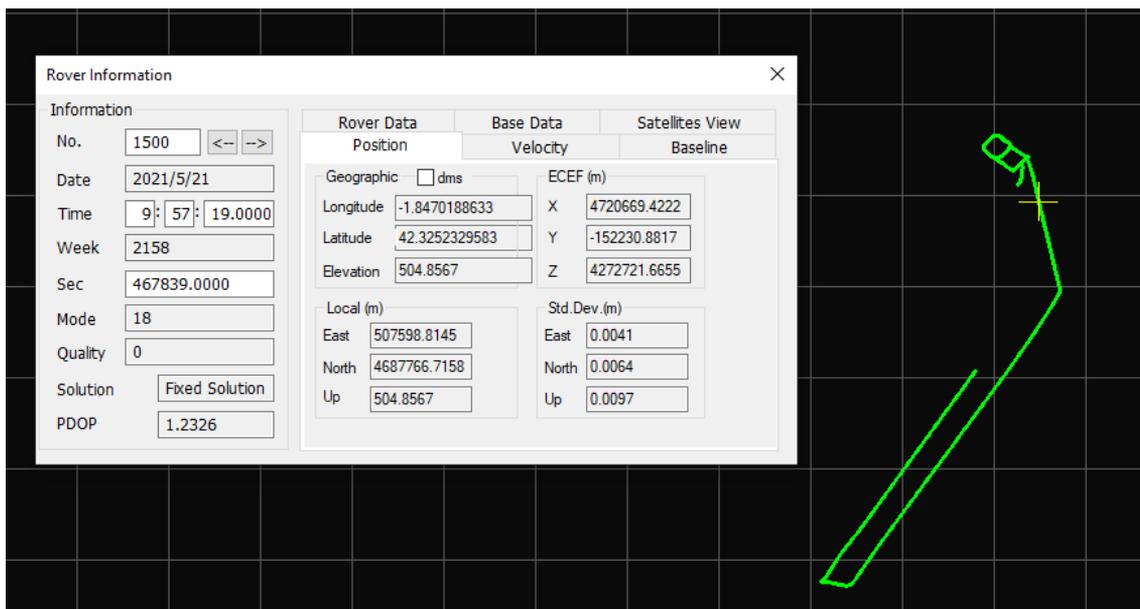


Figura 23: Trayectoria de vuelo con parámetros de cada punto de la trayectoria.

Antes de crear el documento de texto definitivo, se deben establecer los parámetros del sistema de coordenadas de referencia. Con ese fin, se elige la opción *Coordinate System* que se encuentra dentro de *Tool* y se determinan los valores de cada parámetro. Cabe destacar, que para este proyecto se crea una configuración denominada “España” que engloba todas las variables de la zona de interés (ver figura 24). Es

muy importante que los datos introducidos se asemejen a las características del área de estudio, puesto que, en caso de no hacerlo, el programa se bloquea y no se podrá seguir trabajando.

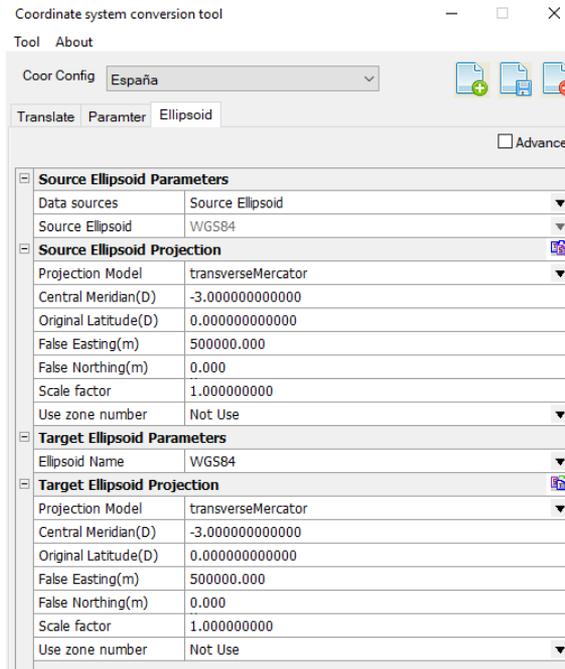


Figura 24: Parámetros del sistema de coordenadas empleado en el proyecto.

Una vez determinada la configuración, mediante la opción *Output* se obtiene un bloc de notas que almacena toda la información relacionada con el sistema GNSS. Para ello, se determinan una serie de características (ver figura 25) que han de considerarse para la creación del producto de interés.

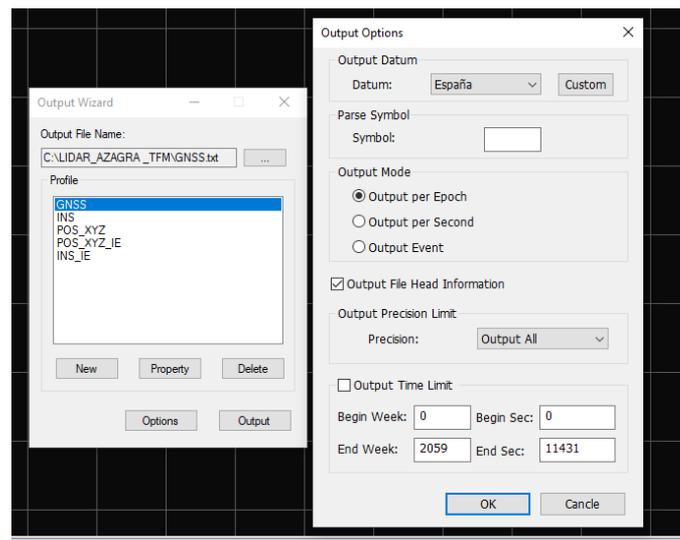


Figura 25: Configuración para obtener el fichero GNSS definitivo.

Después de este último paso, se crea un bloc de notas que contiene información sobre 2301 puntos. Acto seguido, para poder complementar esta información con los datos obtenidos por el sistema de navegación inercial, se crea un nuevo proyecto denominado "INS". Dentro de este, se introduce el archivo ASCII obtenido en el anterior proyecto dentro de la opción *GNSS results* (ver figura 26). Si se tuviera un archivo

correspondiente a los eventos, también habría que introducirlo en este apartado; pero como en este caso se carece de ese tipo de archivo, se deja esa opción sin rellenar.

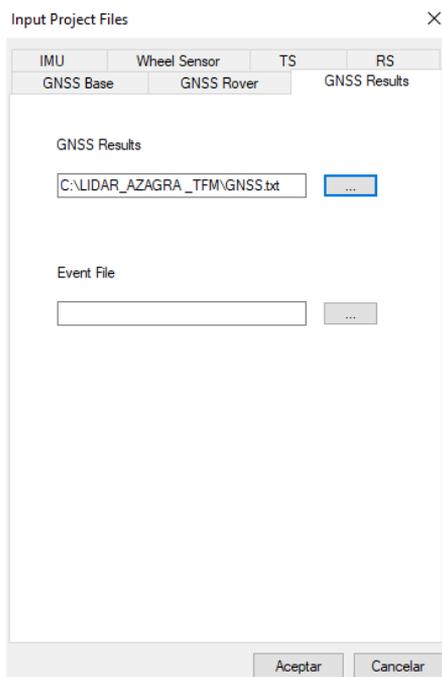


Figura 26: Apartado de “GNSS results” en el proyecto INS.

A continuación, en el apartado de la IMU, se determina cuál es el archivo que almacena todas las posiciones del sistema de navegación inercial (ver figura 27). Es necesario mencionar que este fichero es de extensión *.imu* y se obtiene a partir de la partición realizada en el primero paso del procesamiento.

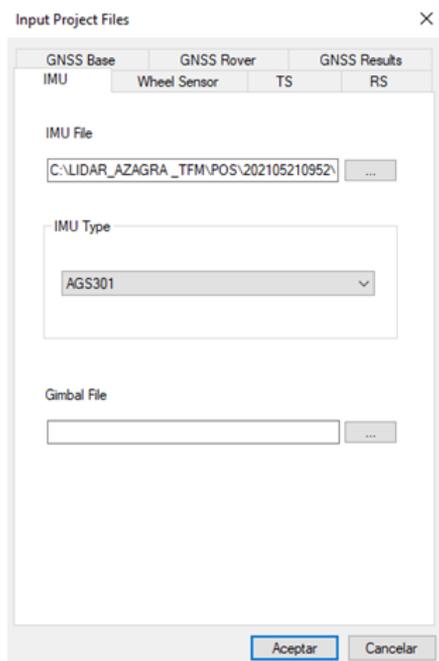


Figura 27: Apartado de “IMU” en el proyecto INS.

Después de haber aceptado la operación, se muestra la trayectoria realizada por la nave teniendo como referencia la información almacenada en la INS (ver figura 28).



*Figura 28: Trayectoria de vuelo basada en el sistema de navegación inercial.*

Seguidamente, se deben integrar las posiciones de cada punto captados por el sistema GNSS y el INS. Con este fin, se elige la opción *GNSS/INS integration*. Tal y como ocurría en el anterior proyecto, se crea una trayectoria (ver figura 29) en la que se almacenan diferentes características (las mismas que en el anterior proyecto) de cada punto. En el proyecto anterior solo se disponía información sobre el sistema GNSS; sin embargo, en este nuevo proyecto se considera la información de ambos sistemas de navegación.

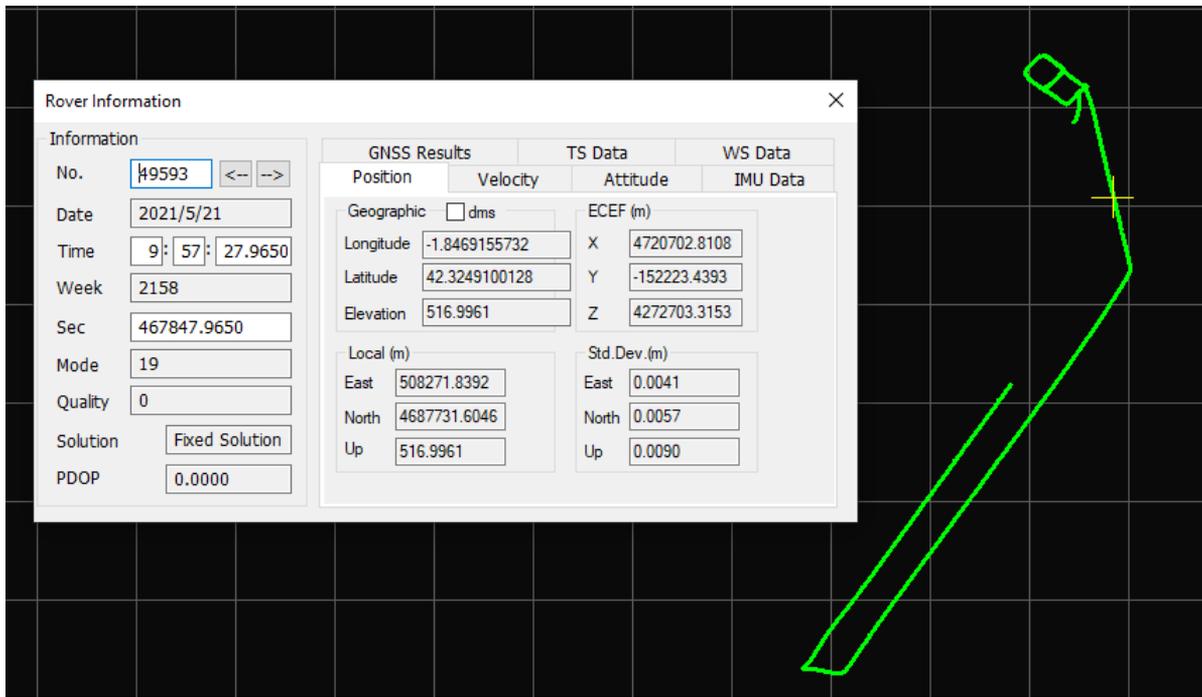


Figura 29: Trayectoria de vuelo con los sistemas GNSS e INS integrados.

Por último, mediante la opción *Output* se crea un documento que muestra toda la información sobre el posicionamiento de puntos. Para este proyecto, se determina que se almacenen las posiciones X, Y, Z y los ángulos de navegación (*pitch*, *roll*, *yaw*) de cada punto y que el datum sea el que se ha empleado anteriormente (ver figura 30).

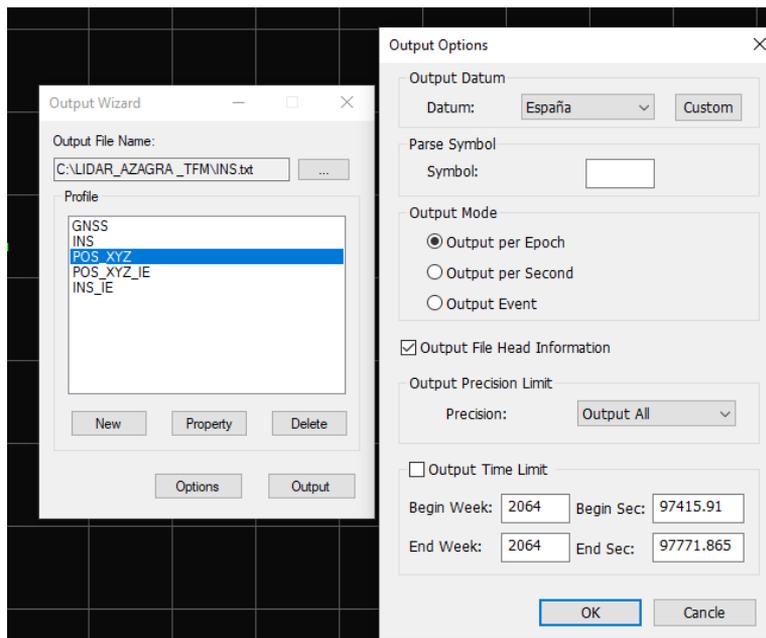


Figura 30: Configuración para obtener el fichero INS definitivo.

Gracias a este último paso, se crea un documento que contiene información sobre un total de 79601 puntos. El número de puntos es mucho mayor en este segundo proyecto porque como se ha comentado, el sistema inercial de navegación capta información a mayor frecuencia en comparación con el sistema GNSS.

### 3.4.2. Procesamiento de datos en g-AirHawk

Teniendo las posiciones precisas de cada punto de la trayectoria, esta parte del proceso se focaliza en el procesamiento de los datos LiDAR. En él, se pretende obtener como resultado varios ficheros LAS en el que se almacene toda la información captada por el sistema. Para eso, se abre un nuevo proyecto en el software de interés y se importan todos los archivos iniciales (ver figura 31): Por un lado, el bloc de notas donde se integra la información captada por los sistemas de navegación; y por el otro, los 7 archivos de extensión *.lid* que almacenan toda la información captada por el propio sistema LiDAR.

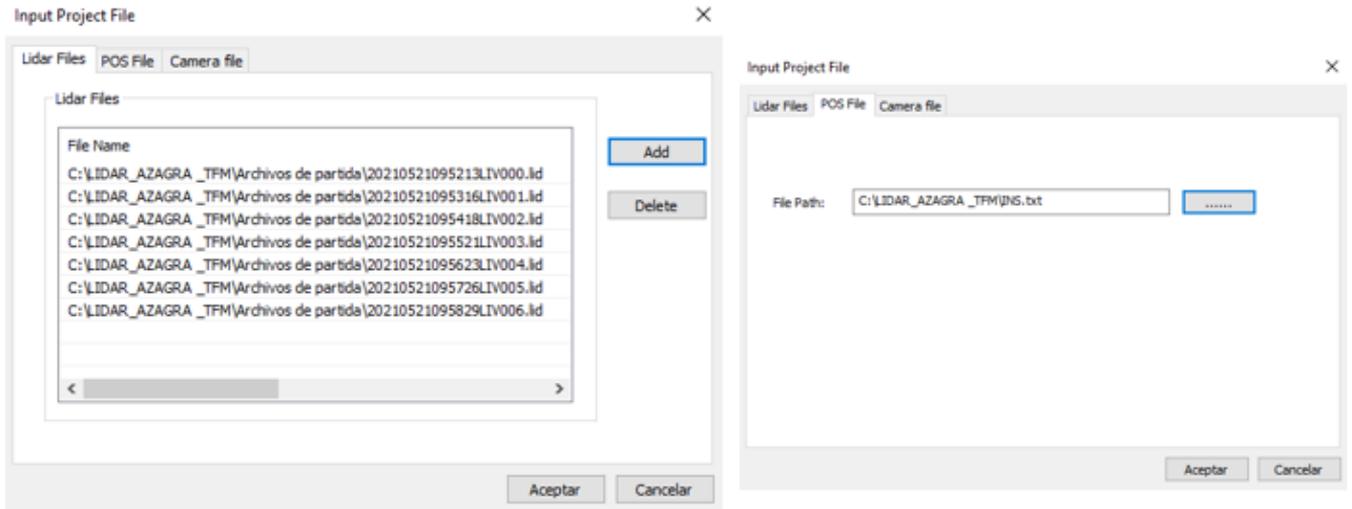
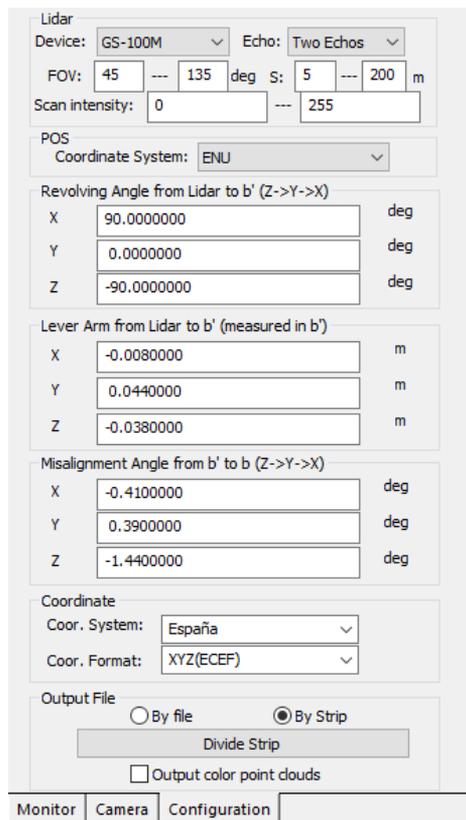


Figura 31: Archivos de partida para el procesamiento en g-AirHawk.

Después, se determinan los parámetros del sistema LiDAR (situados en la parte derecha de la pantalla). Ha de comentarse, que estos varían en función del modelo empleado, por lo que habrá que determinar unos parámetros concretos para cada sistema. En este caso, como se trata de un sistema g-AirHawk GS-100M los valores de las variables son los que aparecen en la imagen (ver figura 32). Además, en el apartado de las coordenadas, se establece cuál es el sistema de referencia (el mismo empleado anteriormente) y en que formato (X, Y, Z) se importa el documento de las posiciones.



Lidar		
Device:	GS-100M	Echo: Two Echos
FOV:	45	135 deg
S:	5	200 m
Scan intensity:	0	255

POS		
Coordinate System:	ENU	

Revolving Angle from Lidar to b' (Z->Y->X)		
X	90.0000000	deg
Y	0.0000000	deg
Z	-90.0000000	deg

Lever Arm from Lidar to b' (measured in b')		
X	-0.0080000	m
Y	0.0440000	m
Z	-0.0380000	m

Misalignment Angle from b' to b (Z->Y->X)		
X	-0.4100000	deg
Y	0.3900000	deg
Z	-1.4400000	deg

Coordinate	
Coor. System:	España
Coor. Format:	XYZ(ECEF)

Output File  
 By file  By Strip  
Divide Strip  
 Output color point clouds

Monitor Camera Configuration

Figura 32: Parámetros del sistema LiDAR g-AirHawk GS-100M.

Posteriormente, eligiendo la opción *divide strip* el programa visualiza la trayectoria realizada por la aeronave a partir de la información y los parámetros especificados. Acto seguido, se traza manualmente las líneas de vuelo y de manera automática el propio programa determina el inicio y el final de cada línea (ver figura 33) .



Figura 33: Visualización de las tres líneas de vuelo de la trayectoria.

Por último, dentro de la herramienta *Data* se elige la opción *output LAS file* y se consiguen tres archivos LAS que corresponden a cada línea de vuelo.

### 3.4.3. Creación de productos mediante *LAStools* y *Python*

En este último apartado del procesamiento de los datos LiDAR, el objetivo principal es conseguir los productos mencionados a partir de los ficheros LAS. Para ello se utilizan tanto el conjunto de herramientas y comandos que engloba *LAStools* como un script de *Python*.

Después de visualizar los metadatos de cada archivo (número de puntos, coordenadas etc.) utilizando *lasinfo*, mediante *lasvalidate* se asegura de que todos los ficheros cumplen con las especificaciones de ASPRS. Posteriormente, se aplica la función *lasoverlap* para poder determinar el grado de superposición entre las líneas de vuelo. Dentro de este comando, es importante especificar que cada archivo corresponde a una línea de vuelo diferente mediante el parámetro *-files\_are\_flightlines*.

Asimismo, se crea el ráster de densidad de puntos mediante los comandos *lasmerge* primero, y *lasgrid* después. Se ha de comentar que no es necesario realizar este primer paso, pero se considera que gracias a él el proceso se llevará a cabo de forma más fácil y visual. La segunda función es la encargada de construir el ráster de interés con un tamaño de píxel de 0,5m en formato TIF. Después de crear el producto, se visualiza en *QGIS* y se ajusta la paleta de color a los valores presentes en el histograma. Como último paso en este control de calidad, también se crea un archivo KML que indica la zona en la que se ha volado. Es imprescindible comentar que se ha incluido el parámetro *-utm30T* para determinar el área geográfica concreta a la que pertenece la zona de estudio.

A partir de este punto, el objetivo principal es llevar a cabo el procesamiento de todos los datos para posteriormente poder construir los productos deseados. Es importante comentar que, si se estuviera trabajando con archivos correspondientes a grandes zonas, se debería utilizar la función *lastile* para crear un mosaico (de zonas de 500x500m, por ejemplo) de la zona de estudio. De la misma manera, también se debería aplicar un buffer (de 30m, por ejemplo) para luego poder volver a unir los archivos LAS. Gracias a

estos pasos, se dividiría una zona de estudio amplia en varias zonas más pequeñas, por lo que se conseguiría trabajar de manera más fácil y eficaz. En este proyecto no hace falta llevar a cabo estos últimos pasos, puesto que se trabaja con una zona relativamente pequeña.

Primero se debe aplicar *lasnoise* a todos los ficheros para poder eliminar los puntos de ruido. Gracias a ello, se excluyen 108 del archivo correspondiente a la primera línea de vuelo, 210 del segundo y 181 del tercero. Para un resultado más óptimo también se podría aplicar la función *las2las* especificando que se deben eliminar los puntos con una intensidad menor a un mínimo establecido.

Una vez eliminados los puntos de ruido, se pasa a la clasificación de puntos de suelo mediante la función *lasground*. Después de asegurar que el comando anterior realiza la clasificación debidamente (visualizándolo en *FugroViewer* por ejemplo), se estiman las alturas de los puntos sobre el suelo mediante *lasheight*. Como consecuencia de estos dos últimos pasos, se estiman las elevaciones necesarias para la creación del MDT y del MDS.

Para poder obtener los primeros rásteres, se unen los tres archivos (dónde ya se han clasificado los puntos de suelo y estimado las alturas) mediante el comando *lasmerge*. Para la elaboración del Modelo Digital del Terreno (MDT) del área de estudio se utiliza la función *las2dem*, en la que se contemplan solamente los puntos pertenecientes a la clase 2 (suelo) con un tamaño de píxel de 0,5m y en formato TIF. Después, se emplea el software *QGIS* para poder visualizar el resultado. Una vez allí, mediante la consulta del histograma se identifican los valores mínimos y máximos, con fin de aplicarlos a una adecuada paleta de color.

El Modelo Digital de Superficies (MDS) es similar al MDT, pero en este caso se toman de referencia todos los puntos del archivo, no solo los que corresponden al suelo. Para su obtención se emplea la función *lasgrid* en el que se calcula la elevación máxima y se establece un tamaño de píxel de 0,5m. De igual manera que en el MDT, se utiliza *QGIS* para la visualización del producto y se ajusta la paleta de color en función al histograma.

Una vez obtenidos el MDS y el MDT de la zona de estudio, mediante la resta entre los dos productos (utilizando la “Calculadora Ráster” de *QGIS*) se logra un archivo que contiene las diferencias de altura (CHM). Para su visualización, se siguen los mismos descritos anteriormente.

En el último paso, se quiere construir un modelo 3D en formato *.py* de la zona de estudio para verificar si los elementos de interés son identificables utilizando *python*. Antes de empezar con dicho proceso, se aplica la función *las2txt* para la creación de un documento que almacene las posiciones de todos los puntos. Después, para poder trabajar de manera más cómoda, se cambia el formato del documento a un archivo *.xyz*; ya que este está especializado en almacenar datos geográficos.

Una vez creado el documento anteriormente mencionado y con la intención de obtener el último producto, se vale de las librerías *numpy* y *open3d*. Se siguen los siguientes pasos (ver figura 34) dentro del script para la obtención de este último producto.

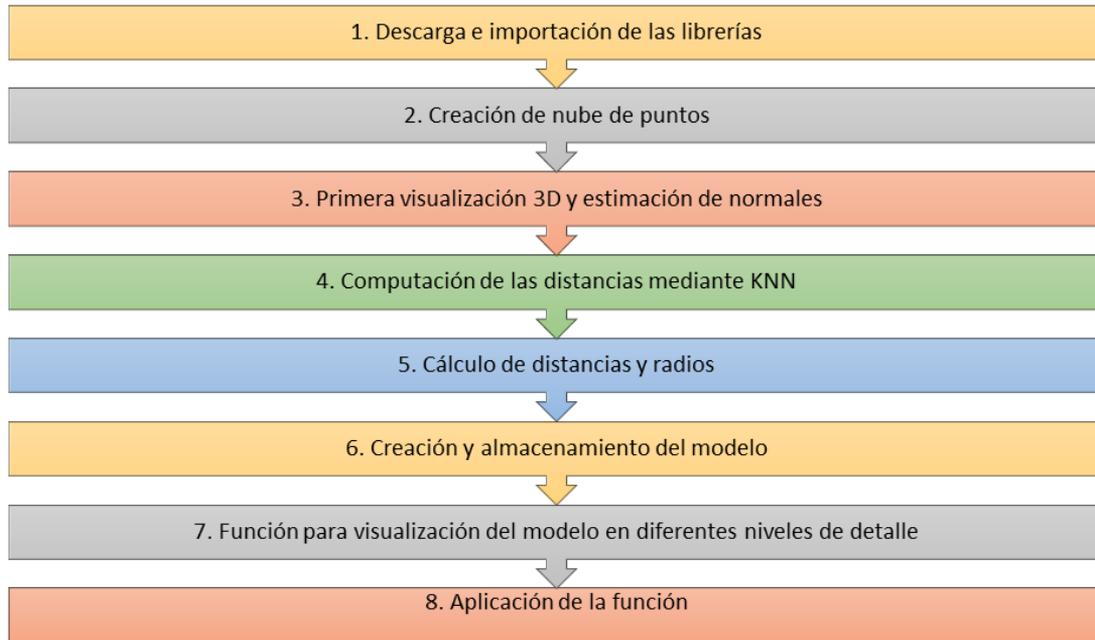


Figura 34: Diagrama de flujo de los pasos en Python.

Por último, gracias a los datos mostrados en CloudCompare, se compara la calidad y el nivel de detalle (empleando el número de puntos o de caras) de este producto con los modelos obtenidos a partir del proceso fotogramétrico.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Procesamiento fotogramétrico de imágenes

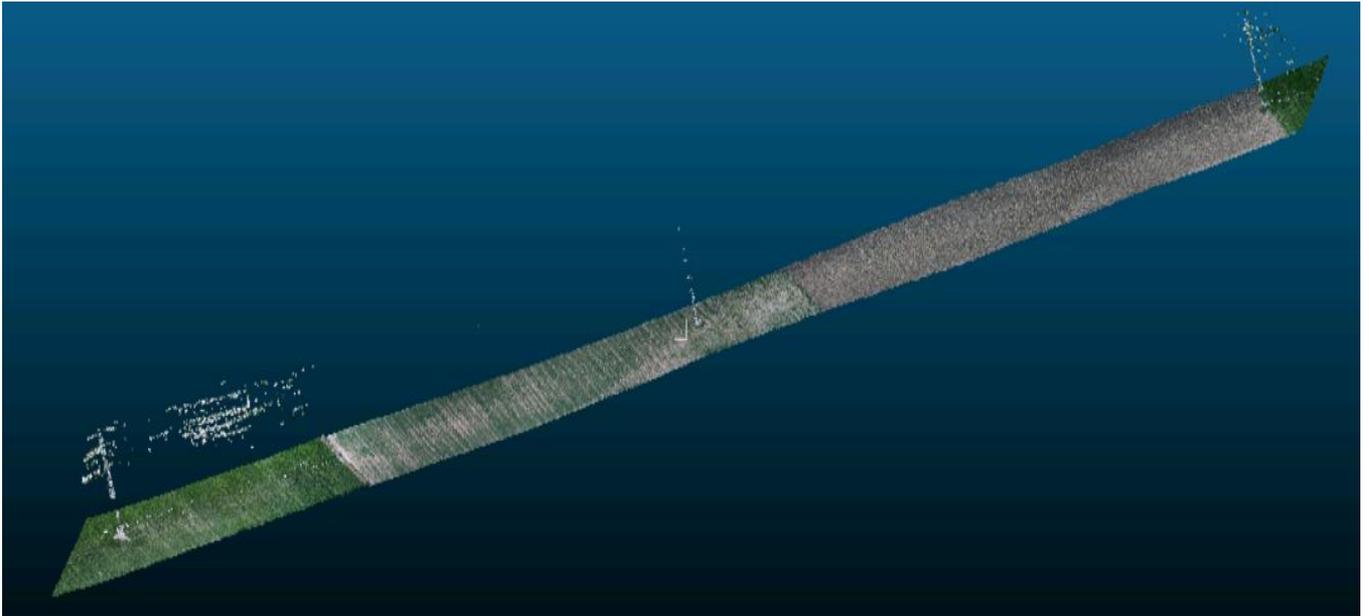
#### 4.1.1. Proyecto sin puntos de apoyo

Mediante la visualización de la nube de puntos densa en el programa *CloudCompare* (ver figura 35) queda claro que todas las torres de la zona de estudio son fácilmente identificables. Esta afirmación se cumple sobre todo en las dos torres de las esquinas, donde es visible que hay mayor número de puntos. Por si eso fuera poco, en la torre de la esquina izquierda se llegan a apreciar puntos correspondientes a los cables eléctricos. Asimismo, cabe comentar que después de la orientación relativa se consiguen 92221 puntos homólogos, y que, además, la nube agrupa en total 16523084 puntos.

Sin embargo, prestando atención a la torre central, queda claro que, aunque sea fácil de identificar, su caracterización es tarea más compleja en comparación con las otras. Esto se debe a que hay menor cantidad de puntos en dicho elemento, por lo que se puede predecir que en los productos posteriores la torre más difícil de identificar será esta. Además, como ya se ha comentado, el único tramo en el que se pueden identificar los cables eléctricos es a la par de la torre izquierda, en toda la zona restante no se puede apreciar el contorno de dichos elementos. Del mismo modo que en la orientación relativa, se podría aumentar la calidad para conseguir este producto, pero el coste computacional que ello supone sería mucho mayor, y se ha comprobado que los resultados obtenidos son muy parejos.

A su vez, queda claro que el número de puntos totales es insuficiente, ya que no se consiguen caracterizar con mucho detalle los elementos de interés. En trabajos previos con características similares se ha visto que este número incrementa considerablemente (Alidoost & Arefi, 2017). Por lo que se intuye, que el origen del error podría estar en este factor. Además, también ha sido comprobado que la cantidad de puntos también

depende de otros factores como la cantidad de imágenes o la cámara empleada (Niederheiser et al., 2016), por lo que podría ser interesante realizar otras pruebas variándolos.



*Figura 35: Nube densa de puntos sin GCP.*

En el modelo 3D (ver figura 36) se puede realizar un comentario similar. Las torres de las esquinas son las que se identifican más fácilmente, y por si eso fuera poco, en la izquierda aún se pueden reconocer los cables eléctricos.

Sin embargo, mediante el análisis visual queda claro que en este producto ha habido una gran pérdida en cuanto a nivel de detalle y a calidad en comparación con el anterior. Es visible que el número de puntos por cada elemento ha disminuido considerablemente, lo que dificulta la correcta visualización. Este efecto es particularmente recalable en la torre central, ya que es de gran complejidad identificarla debido a la poca cantidad de puntos. Analizando de forma más profunda el producto, se determina que el número de caras es de 3304615.

En otras investigaciones llevadas a cabo sin puntos de apoyo, se ha comprobado que para obtener un número mayor de caras y conseguir una mayor calidad, es necesaria la medición de los puntos de enlace, así como una triangulación aérea asistida por GPS (Forlani et al., 2013). Por ello, podría ser interesante realizar otro proyecto con los cambios que se acaban de mencionar.



*Figura 36: Modelo 3D sin GCP.*

De igual manera que en el caso anterior, al pasar de un producto a otro (en este caso del modelo 3D al ortomosaico) la calidad y el nivel de detalle se reducen considerablemente (ver figura 37). Por ello, la identificación de las torres es más difícil que en el producto anterior. Además, queda claro que en todos los elementos de interés no se consigue ningún tipo de sensación de realce. Gracias a este hecho, se sabe que las imágenes fueron captadas con una visión nadiral. Para poder gozar de sensación de realce en el ortomosaico y de elevación en el modelo 3D, es imprescindible realizar vuelos con visión oblicua puesto que de esta manera se consigue una visión más amplia de los elementos de interés (Verhoeven, 2011).

En cuanto a la extensión de la capa, se afirma que ocupa toda el área de estudio, puesto que se visualizan tanto los elementos de interés (torres y cables eléctricos) como sus alrededores.



*Figura 37: Ortomosaico sin GCP.*

Mediante la visualización simultánea en *QGIS* del ortomosaico construido y la ortofoto de máxima actualidad descargada desde IDENA (ver figura 38), se aprecia la exactitud de las posiciones entre lo construido y la realidad. Al visualizar ambos productos, queda claro que las ubicaciones de las torres en lo construido no se acoplan debidamente al entorno real. Además, en ambas ortofotos se hace imposible la correcta identificación de los cables de alta tensión, ya que da la impresión de que estos están situados a la par del suelo.

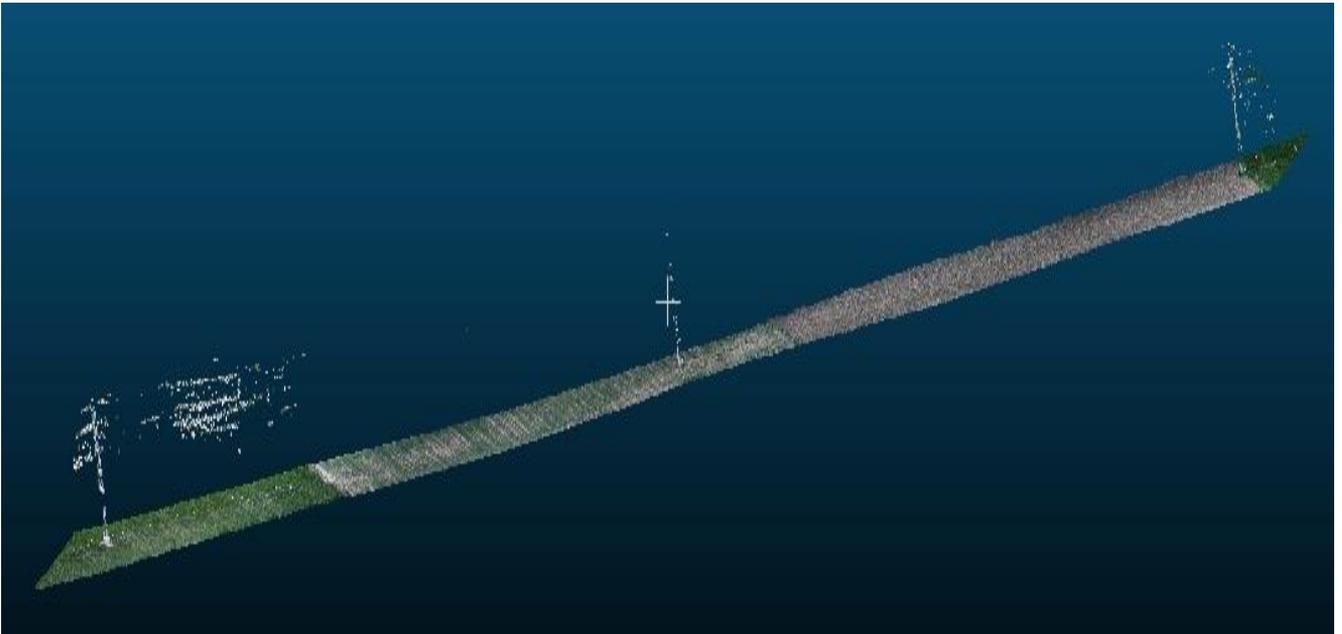


*Figura 38: Visualización simultánea de ortomosaico sin GCP y ortofoto de máxima actualidad.*

#### 4.1.2. Proyecto con puntos de apoyo

Al comparar esta nube de puntos (ver figura 39) con la obtenida en el anterior proyecto, queda claro que hay ciertas similitudes entre ambas. Por un lado, la torre más fácil de identificar y caracterizar es la situada en la esquina izquierda; y por si eso fuera poco, también se aprecian varios cables eléctricos a su alrededor. Por otro, la torre derecha también se distingue con bastante claridad; y, por último, aunque haya menos puntos en su ubicación, la torre central también es identificable.

Sin embargo, hay ciertos detalles que destacan una mayor calidad en esta última nube de puntos. Aunque la visualización de la torre izquierda se asemeja bastante en ambos productos, queda claro que en esta nube de puntos la torre central es más fácil de detectar visualmente. Además, gracias a los puntos de apoyo también se es capaz de distinguir varios cables en los alrededores de la torre derecha. Ubicando puntos con coordenadas precisas y construyendo la nube densa de puntos a partir de estos, el software es capaz de identificar los elementos de interés y muestra más puntos en ellos. Esto se debe a que el programa realiza los cálculos para la obtención de productos centrándose en los puntos ubicados, y gracias a ello, es capaz de detectar de forma precisa los elementos presentes en todas las imágenes. Esta mejora también queda reflejada al realizar la comparación de forma analítica, por lo que se ve que el número de puntos en este producto (20985046) es mayor si se compara con el obtenido en el proyecto anterior.



*Figura 39: Nube densa de puntos con GCP.*

De la misma manera que ocurre en el proyecto anterior, al pasar de la nube densa de puntos al modelo 3D se pierde gran cantidad de información; por lo que disminuyen tanto la calidad como el grado de detalle del último producto (ver figura 40). Este hecho es visible en toda la zona de estudio, ya que, por ejemplo, la torre central o los cables situados en la esquina derecha son difícilmente distinguibles del resto de elementos. Además, aunque se siga identificando fácilmente, también se aprecia un claro decrecimiento en la calidad de la torre izquierda y de sus alrededores. Todos estos hechos se deben a la falta de una pasada de vuelo con visión oblicua, por ello, el software no es capaz de identificar debidamente los elementos de interés y no muestra la suficiente cantidad de puntos.

Sin embargo, comparando este producto con el obtenido en el proyecto anterior, se afirma que sigue habiendo un ligero grado de mejora, dado que en este proyecto el número de caras en incrementa hasta alcanzar un valor de 4197009 caras.



*Figura 40: Modelo 3D con GCP.*

Visualizando el MDE (ver figura 41) queda claro que la distribución de los puntos de apoyo no es la óptima. Al situarlos en línea recta, el programa no es capaz de delimitar la zona de estudio correctamente, lo que provoca los errores representados en este producto. Se ha comprobado que para la correcta delimitación de la zona de estudio es necesario distribuir los puntos de manera homogénea y ubicar más de tres puntos (Tonkin & Midgley, 2016). Por ejemplo, como en este caso se trabaja en una zona de forma rectangular, se podría ubicar un punto en cada esquina del rectángulo (habría 4 en total) y otros dos en las esquinas de la zona central.

Además, también sería conveniente ubicar varios puntos de control en la zona de estudio. Estos no se emplean para realizar los cálculos en la obtención de productos (hecho que sí sucede con los puntos de apoyo), si no que su función se centra en trabajar con datos más precisos (sobre todo en cuanto a la ubicación) y disminuir el error de los productos. A su vez, se ha visto que contando con mayor porcentaje de solape entre imágenes se han llegado a obtener modelos de alta calidad y muy alta precisión (Frey et al., 2018).

Por otra parte, las alturas no se estiman correctamente, por lo que a un lado de las líneas eléctricas se representan de color rojo cotas de 428m, y a la derecha, mediante el color verde son visibles zonas de 354m. Este error también se atribuye a la ubicación de los puntos de apoyo. En lugar de situarlos utilizando fuentes externas (MDE y ortofoto en este caso), sería conveniente realizar ese trabajo a nivel de campo (con GPS diferencial, por ejemplo), donde la ubicación sería lo más precisa posible. De esta manera se prevé que los errores mencionados disminuirían.

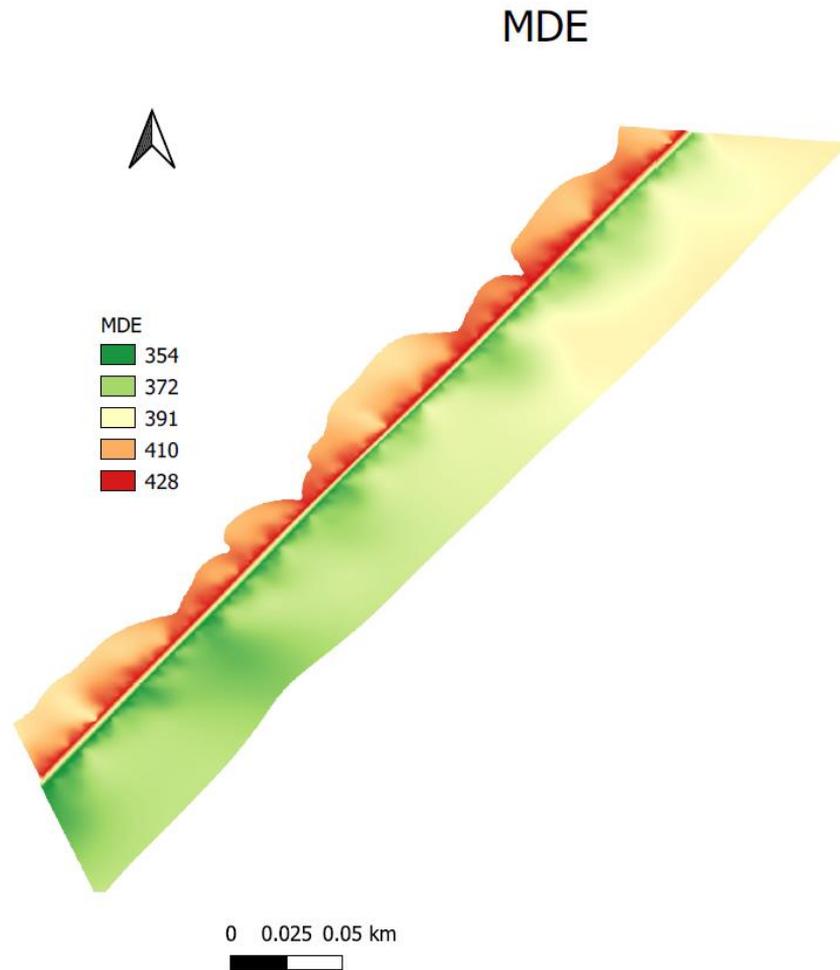


Figura 41: Modelo Digital de Elevaciones con GCP.

Construyendo el ortomosaico a partir del MDE (ver figura 42) es visible que el realce de las torres sobre el suelo ha mejorado, aunque habría que aplicar más zoom para apreciar dicho efecto de forma más clara. Tal y como ocurre en producto anteriores, la torre que mejor se identifica y presenta un mayor grado de detalle es la ubicada en la esquina izquierda.

Sin embargo, centrandó la atención en la extensión de la zona de estudio, esta ocupa mucha menos área que lo que se pretendía. Este error se achaca a los factores relacionados con la distribución de los puntos de apoyo mencionados anteriormente.



*Figura 42: Ortomosaico con GCP.*

También es interesante visualizar el ortomosaico generado con la ortofoto de máxima actualidad de manera simultánea (ver figura 43). Gracias a ello, se asegura que la ubicación de la zona de estudio se asemeja bastante bien a la realidad. Sin embargo, tal y como ocurría en el anterior proyecto, los cables eléctricos no se caracterizan e identifican correctamente en este ortomosaico. Asimismo, como los puntos se ubican en línea recta, el producto construido no es capaz de representar correctamente toda la zona de estudio, que abarca tanto la línea que une las tres torres como sus alrededores.



Figura 43: Visualización simultánea de ortomosaico con GCP y ortofoto de máxima actualidad.

Además de la correcta ubicación de los GCP también sería conveniente aplicar el proceso PPK (*Post Processing Kinematic*) para aumentar la precisión de todas las posiciones. De esta manera, se ha visto (Zhang, Zhang & Zhu, 2020) que después del procesamiento dicha variable se ve incrementada hasta alcanzar 1-2cm de precisión.

Por último, se debe comentar que, con el fin de solventar los problemas anteriormente mencionados, se intentó recoger de nuevo los datos de partida, pero debido a la meteorología o la complejidad que mostraba el terreno no se pudo adquirir dicha información.

#### [4.2. Procesamiento de datos LiDAR](#)

En este apartado se presentan y comentan uno por uno todos los resultados que se han ido obteniendo a lo largo del proceso. Se ha de recalcar, que en el procedimiento llevado a cabo en el programa *Shuttle* solo se obtiene como resultado un bloc de notas con información relacionada con las posiciones de la trayectoria, por lo que este bloque se abrirá mostrando directamente las representaciones adquiridas a partir de ese punto.

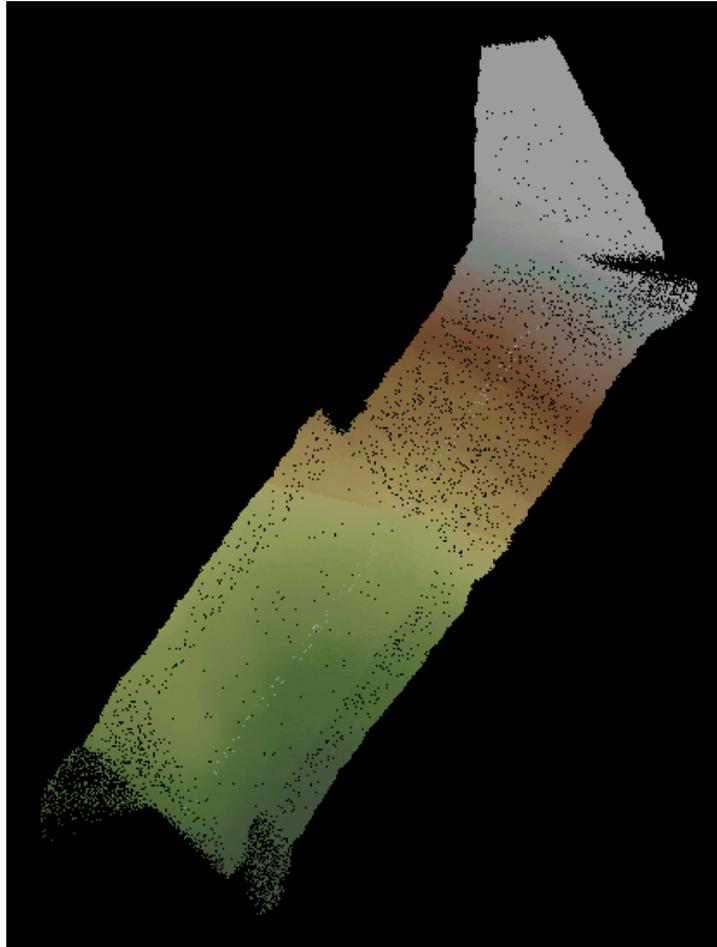
##### [4.2.1. Procesamiento de datos en q-AirHawk](#)

En la figura 44 se muestra el archivo LiDAR obtenido a partir de la unión de las tres líneas de vuelo utilizando el comando *lasmerge*. En primer lugar, se observa que el enlace entre los tres archivos se ha llevado a cabo de manera exitosa, ya que la zona de estudio queda representada debidamente. Además, también se puede

identificar cierto grado de solape entre las líneas de vuelo tanto en la parte central, como en la zona norte de la zona de estudio.

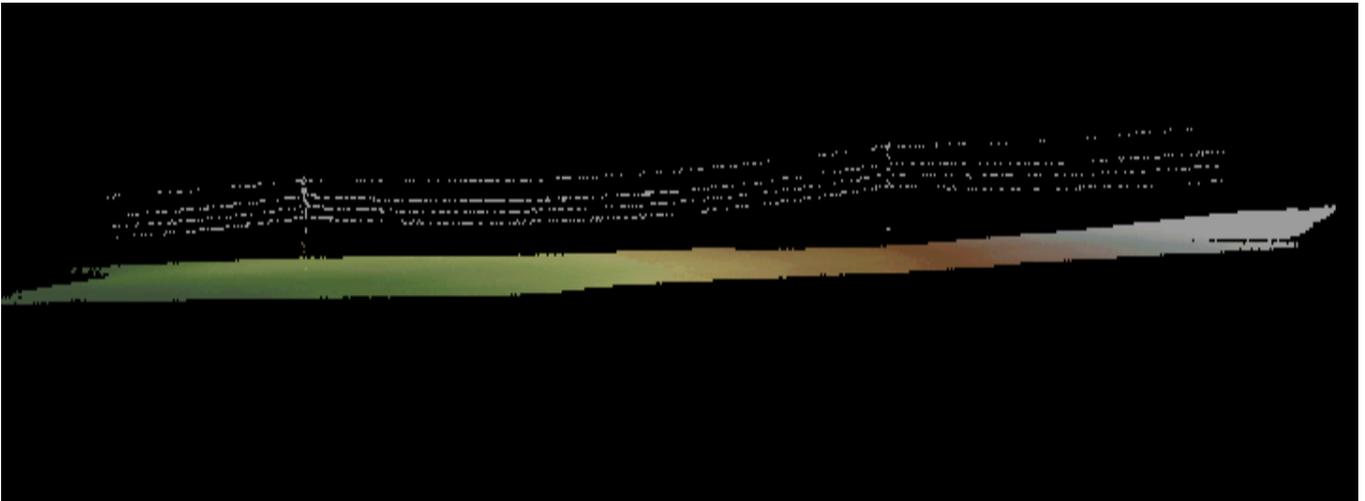
Cabe comentar que, para la visualización del archivo, se colorean los puntos basándose en sus alturas. Por ello, las zonas más altas (coloreadas de color grisáceo) se sitúan en el norte; mientras que las bajas se ubican en el sur (coloreadas de color verde/amarillo). Sin embargo, en la zona central predominan los valores intermedios, por lo que se representa de color marrón.

Además, al poner atención sobre la parte central, también se es capaz de identificar las líneas eléctricas (representadas en color gris) presentes en la zona de estudio.



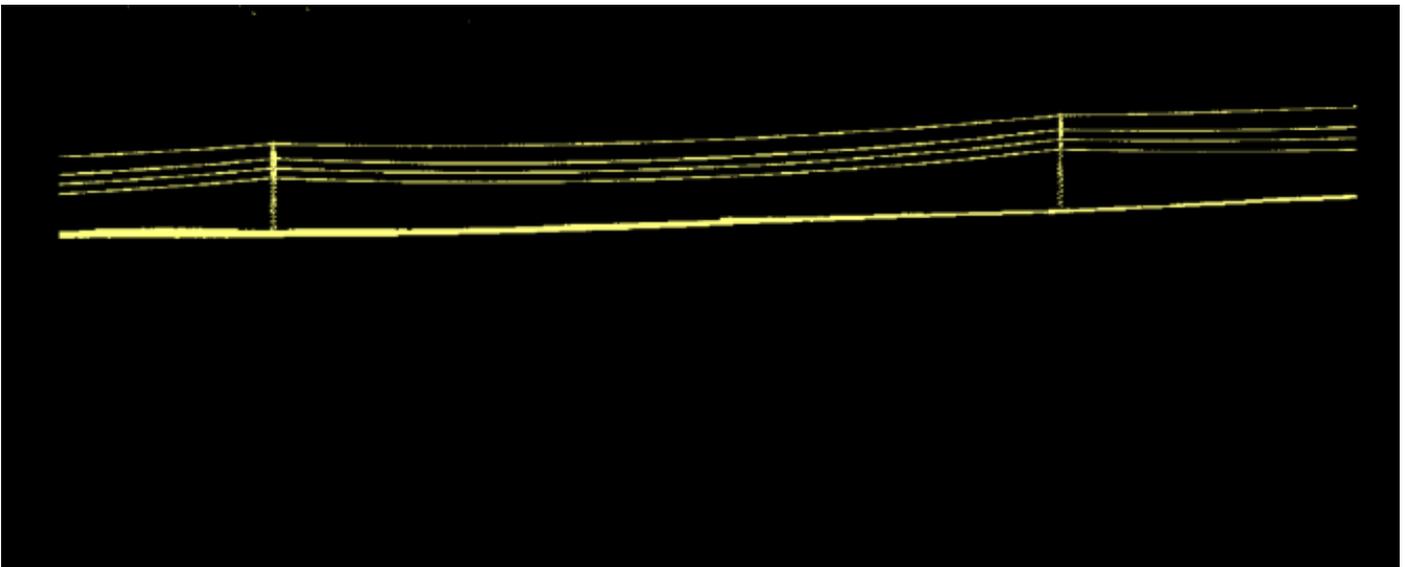
*Figura 44: Visualización zona de estudio completa en FugroViewer aplicando la paleta de colores a las alturas.*

Una vez visualizado el archivo LiDAR que contiene toda la zona de estudio, se rota para visualizar una vista en alzado de la red eléctrica (ver figura 45), para ver si las torres y los cables se identifican con facilidad. En este caso, se afirma que el segundo elemento mencionado es fácilmente distinguible, pero en cambio, la identificación de las torres (aunque también se llegan a diferenciar) es una tarea más complicada. Puesto que la zona está representada basándose en la altura de los puntos, tanto los cables como las torres eléctricas se visualizan de color gris, que se corresponde con la altura máxima de la zona.



*Figura 45: Visualización 3D de la zona de estudio en FugroViewer.*

Para terminar con la visualización del archivo, se construye el perfil de la zona considerando el recorrido de los cables y las dos torres (ver figura 46). Gracias a ello, aunque todo el archivo esté representado de color amarillo, se identifican de forma muy clara los dos elementos de interés.



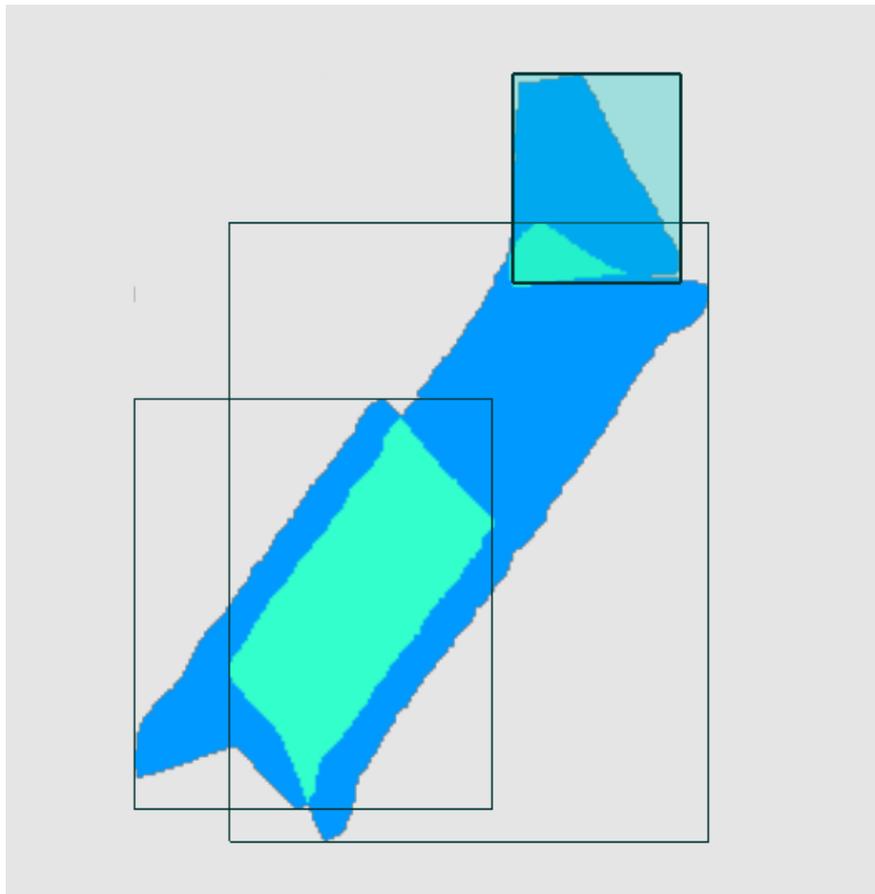
*Figura 46: Perfil de la zona de torres y cables.*

Después de visualizar las figuras presentadas anteriormente, queda claro que el procesamiento de datos en los programas *Shuttle* y *g-AirHawk* se ejecuta correctamente, ya que los elementos de interés son distinguibles en el archivo LAS que contiene toda la zona de estudio. Sin embargo, se ha de tener presente que este archivo parte de datos que no han sido sometidos a ningún tipo de procesamiento, por lo que las representaciones no se hubieran podido llevar a cabo si se hubiera considerado otro tipo de variable (como por ejemplo la clasificación de puntos).

#### 4.2.2. Creación de productos mediante *LAStools* y *Python*

En la figura 47 se representa mediante el comando *lasview* la superposición entre las tres líneas de vuelo. El cuadrante de arriba pertenece a la primera línea, el del medio a la segunda y el de más abajo a la tercera. Queda claro, que la información contenida y el área ocupada por el segundo archivo es mucho mayor en comparación con el resto. Sin embargo, también es visible que la tercera línea de vuelo ocupa una zona bastante ancha; mientras que la primera es la que menos información contiene. Esto se debe a que la parte inicial de la trayectoria se centró en el ajuste y calibración de todos los parámetros de vuelo, y, por lo tanto, se emplearon la segunda y tercera línea para la recogida de datos.

En cuanto a la superposición entre los archivos, queda claro que la primera y segunda están ligeramente superpuestas. Este hecho se puede visualizar gracias a la zona coloreada en azul turquesa presente entre ambas líneas. Por si eso fuera poco, también existe gran grado de superposición entre los dos últimos archivos, representado también por la amplia zona visualizada en el mismo color. Por tanto, la segunda línea se superpone con las otras, hecho lógico teniendo en cuenta la amplia zona que ocupa. Se debe comentar que este grado de superposición en las líneas de vuelo es clave a la hora de fusionar los archivos LAS, ya que, sin él, podrían haberse creado espacios sin información.



*Figura 47: Superposición entre las líneas de vuelo representada en azul turquesa.*

Para la visualización del ráster de densidad de puntos en *QGIS* (ver figura 48) se opta por una rampa de color que varía del verde (valores más bajos) al rojo (valores más altos). Dentro de esta se considera un rango de

valores entre 250 (píxeles representados en color verde) y 1000 (píxeles representados en color rojo). Además, prestando atención a las torres eléctricas, se afirma que la densidad de puntos en este elemento es la más alta posible (teniendo como referencia la escala en la que se trabaja). Por otro lado, las líneas se visualizan de color amarillo-rojizo, lo que significa que se encuentran valores de entre 500-1000 píxeles por metro cuadrado.

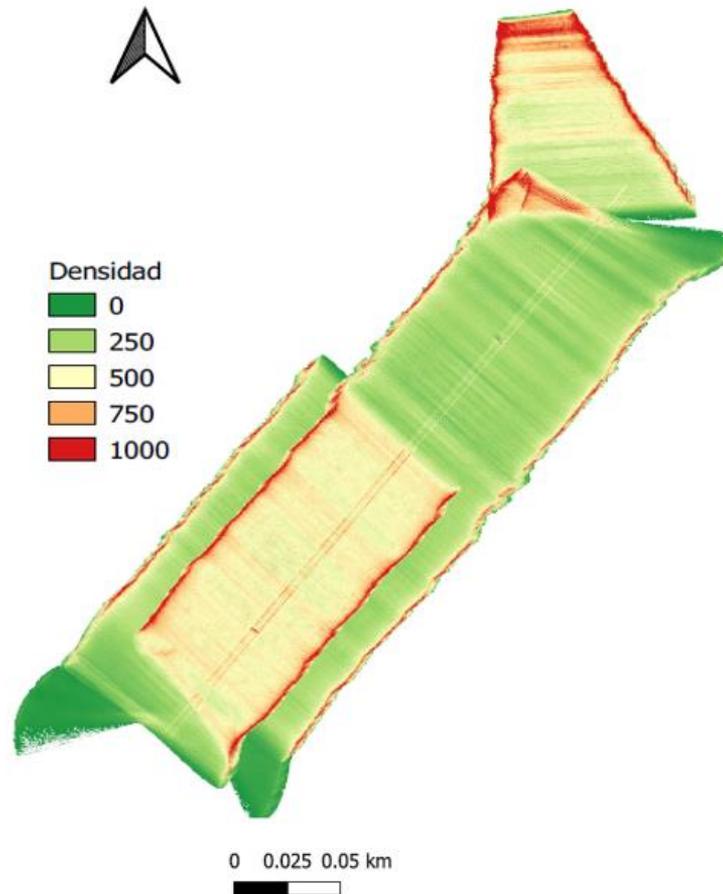


Figura 48: Producto ráster de intensidad de puntos.

Analizando el ráster y visualizando su histograma (ver figura 49), se afirma que predomina el color verde en la mayor parte de la zona de estudio, donde se ubican los píxeles de menor valor. Además, también se puede ver que la frecuencia de píxeles con valores medios (300-600) es bastante alta, y por eso son observables amplias zonas de color amarillo-verde claro. Por último, los píxeles con valores altos ocupan la menor parte de la zona de estudio, puesto que el área ocupada por el color rojo es bastante pequeña. Sin embargo, dichas áreas se relacionan con las zonas de superposición entre las líneas de vuelo y con ciertos laterales de la representación.

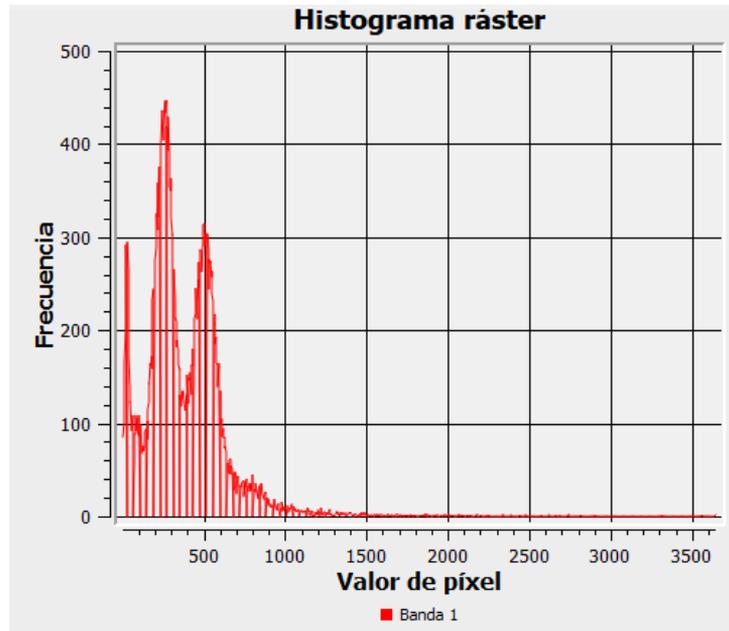


Figura 49: Histograma del raster de densidad de puntos.

Cabe comentar que la densidad de puntos mostrada en la representación es más alta que la que se obtiene en otras investigaciones. Por ejemplo, se ha visto que, en datos recogidos por una aeronave con un sistema LiDAR incorporado, el máximo de densidad puede rondar los 114 puntos/m<sup>2</sup> (Pirotti & Taolli, 2010). Además, si comparamos los datos conseguidos en esta investigación con la densidad de puntos propia de vuelos realizados por avión, esta diferencia incrementa aún más. Por ejemplo, en el proyecto del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA-LiDAR), se trabaja con un mínimo de densidad de puntos de 0,5 puntos/m<sup>2</sup> (Lorite et al., 2015). Aun así, se ha de recalcar que la densidad de puntos depende en gran medida tanto de la altura de vuelo como del sensor empleado (Jeong et al., 2019).

Mediante el comando *lasboundary* mencionado en el apartado de la metodología, se es capaz de crear un archivo *kml* que contenga las tres líneas de vuelo y delimite la zona geográfica que se ha volado (ver figura 50). Se vuelve a apreciar la extensión que ocupa cada línea de vuelo; donde queda claro que la segunda línea es la que más zona abarca, seguido por la tercera y, por último, la primera.

Sin embargo, la zona representada en la imagen no es la misma que la que se voló en realidad (aunque se sitúa cerca de ella). Este error tiene su origen en que los archivos LiDAR construidos en *g-AirHawk* no llevan incorporado el sistema de coordenadas en el que se trabaja, es decir, en los metadatos no existe este tipo de información. Para poder solventar el error, se intenta determinar la zona geográfica concreta a la que pertenece la zona de estudio (UTM zona 30T), pero la ubicación no es lo más exacta posible.



Figura 50: Archivo kml que limita la zona de estudio.

En la figura 51 se muestra el Modelo Digital del Terreno (MDT) creado a partir del comando *las2dem*. Cabe destacar, que el rango de colores y sus valores asociados son iguales a los empleados en el ráster de densidad de puntos. Por ello, se sabe que las zonas rojas se relacionan con valores de altura máximos (463m) y, por el contrario, el color verde se asocia con cotas mínimas (444m). Sabiendo esto se afirma que las cotas más altas corresponden al norte de la zona de estudio; mientras que en las más bajas predominarían valores de elevación mínimos. Además, en la parte central de la zona de estudio se encuentran los valores intermedios. Estas afirmaciones confirman la información presente en el archivo LAS que une las tres líneas de vuelo.

Teniendo en cuenta lo comentado anteriormente, se sabe que los elementos de interés (líneas y torres eléctricas) se sitúan dentro de una zona cuya cota varía entre 444 y 463m. Todos estos valores se obtienen visualizando el histograma de la capa (ver figura 52). Además, gracias a este análisis se sabe que la mayoría de los píxeles se agrupan entorno a los 445-450m.

Para verificar si los datos conseguidos se asemejan a la realidad, se emplea el MDT de 50cm de 2017 provisto por la Cartoteca/Fototeca de Navarra. Comparando la información mostrada en la figura 51 con la obtenida de la Cartoteca, se verifica que las cotas mostradas en las dos fuentes de información son muy similares. Cabe recordar que la zona representada en el MDT es la misma que se muestra en la figura 50, por lo que no corresponde exactamente al área que se voló.

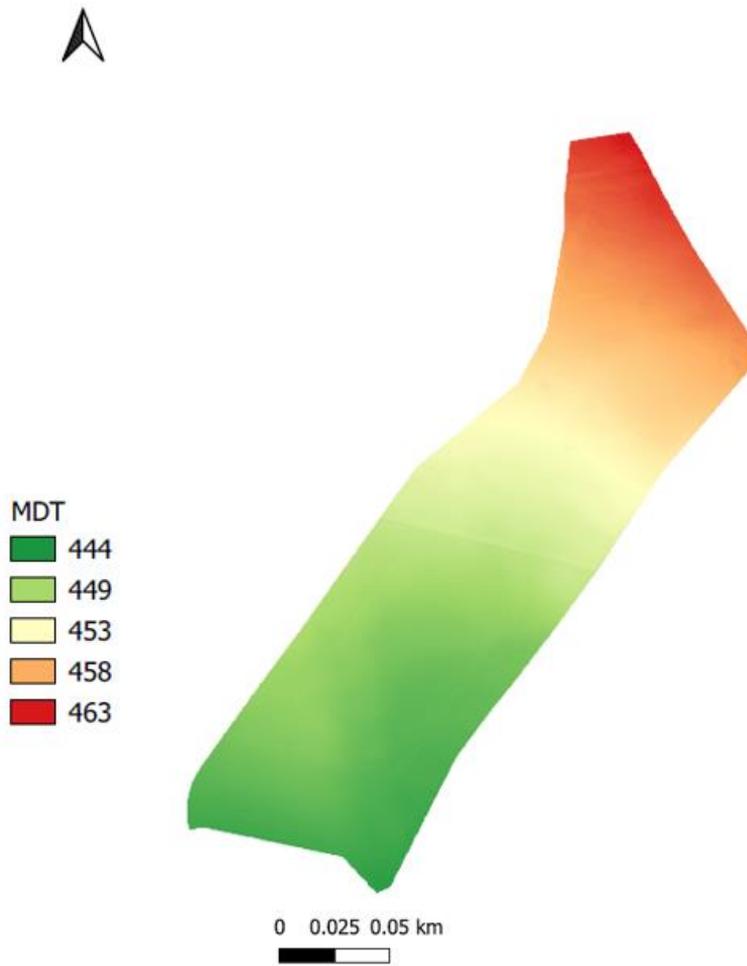


Figura 51: Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio.

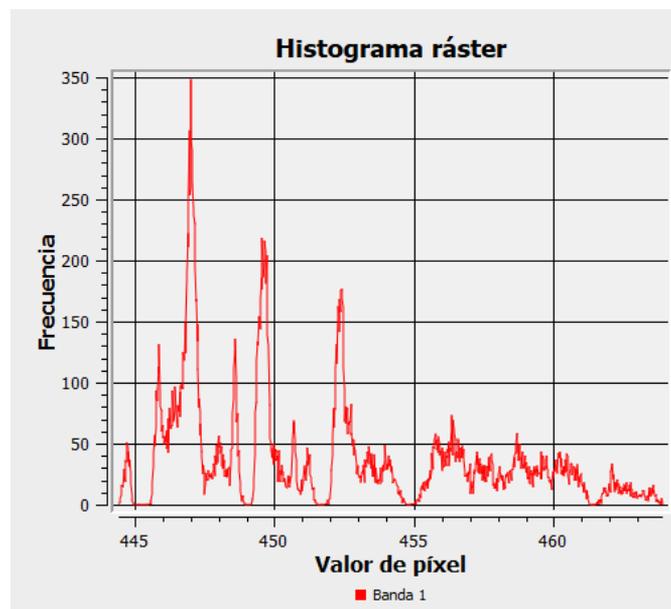


Figura 52: Histograma del Modelo Digital del Terreno.

Visualizando el Modelo Digital de Superficies (MDS) de la zona (ver figura 53), se puede extraer la misma información mencionada en la figura 51: Según se avanza hacia el norte, los valores de altura son más

grandes; visualizados en este caso mediante el color amarillo. Aun así, se ha de comentar que los valores en este ráster son mayores que los mostrados anteriormente, ya que para la creación de este producto se han tenido en cuenta todos los elementos de la superficie (no solo la altura del terreno sobre el nivel del mar).

También se observa que las torres y los cables se identifican con suma facilidad y que además son los elementos más altos de la zona de estudio. Por ello, la representación de ambos se expone en un color amarillo/rojizo. A su vez, también se confirma la escasez de otros elementos de altura (como, por ejemplo, algún tipo de vegetación) en la zona, dado que la mayoría del área está representada de color verde.

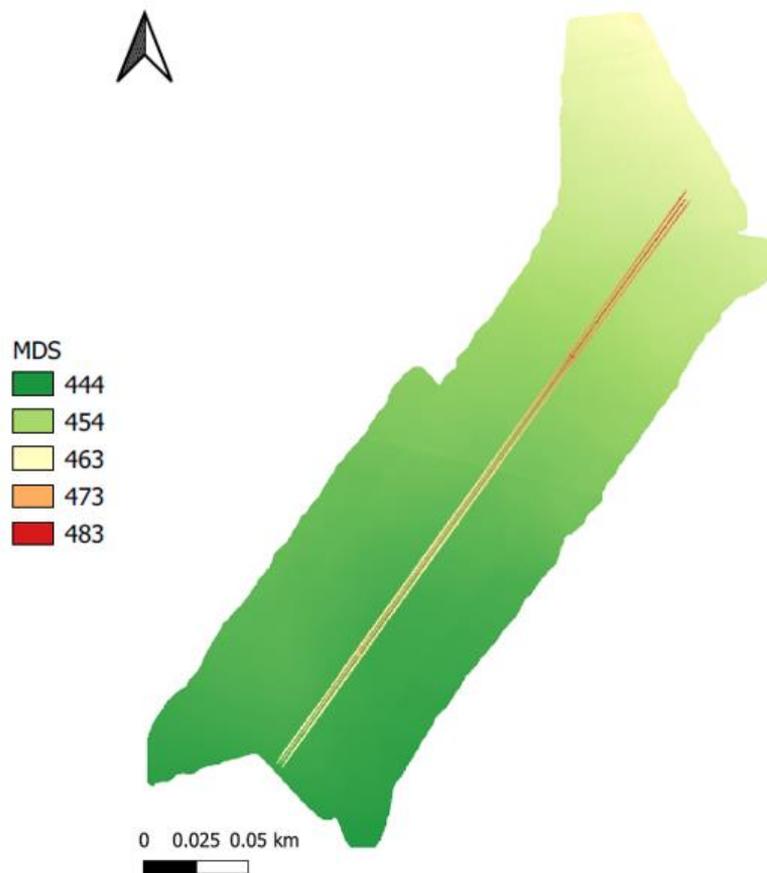


Figura 53: Modelo Digital de Superficies de la zona de estudio.

Estudiando la distribución de los píxeles en el histograma (ver figura 54) se puede realizar un comentario muy similar al del MDT, ya que la mayoría de ellos se agrupan dentro de los valores pequeños/intermedios. Sin embargo, los valores más altos (correspondientes a los elementos de interés) son minoría en la representación.

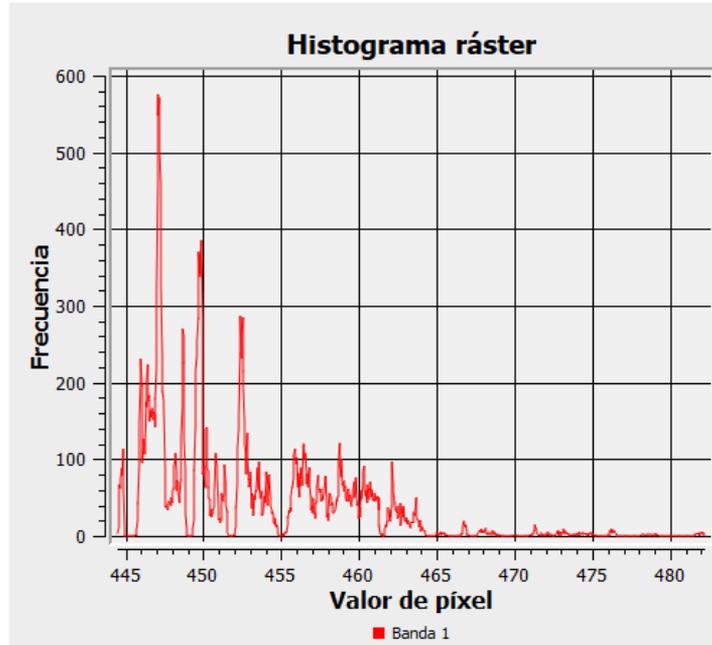


Figura 54: Histograma del Modelo Digital de Superficies.

Restando los dos productos anteriores, se obtiene el ráster con la diferencia de alturas para la zona de estudio (ver figura 55). En él, se reafirma la ausencia de elementos con altura, por lo que la resta entre el Modelo Digital de Superficies y el Modelo Digital del Terreno es 0 (valor representado en color verde) para la mayor parte del mapa. Además, visualizando los valores correspondientes al color amarillo y al rojo, se determina que la altura de los cables y las torres ronda los 20-25m.



Figura 55: Modelo sobre Alturas de Suelo de la zona de estudio.

Estudiando el histograma de la representación (ver figura 56) se verifica la información explicada en el párrafo anterior. Por lo que en el valor 0 se agrupan la mayoría de los píxeles de la imagen, y sin embargo, en los valores aproximados a 20 también se identifican varios píxeles aislados.

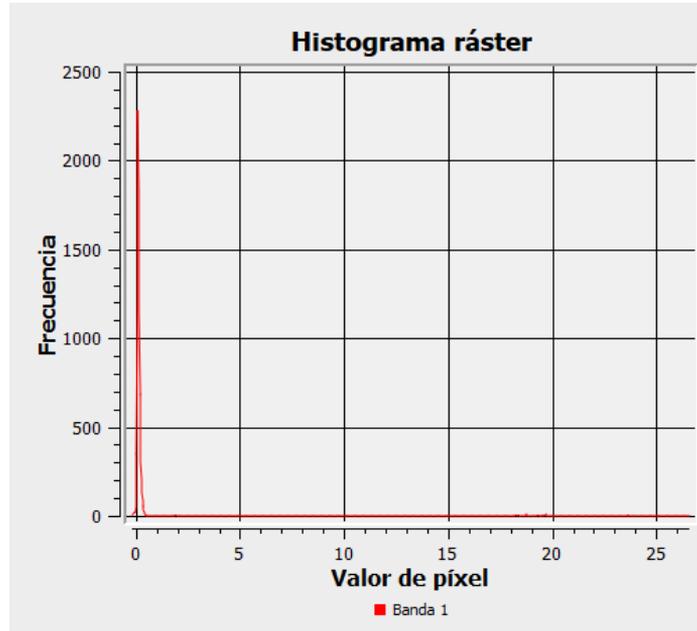
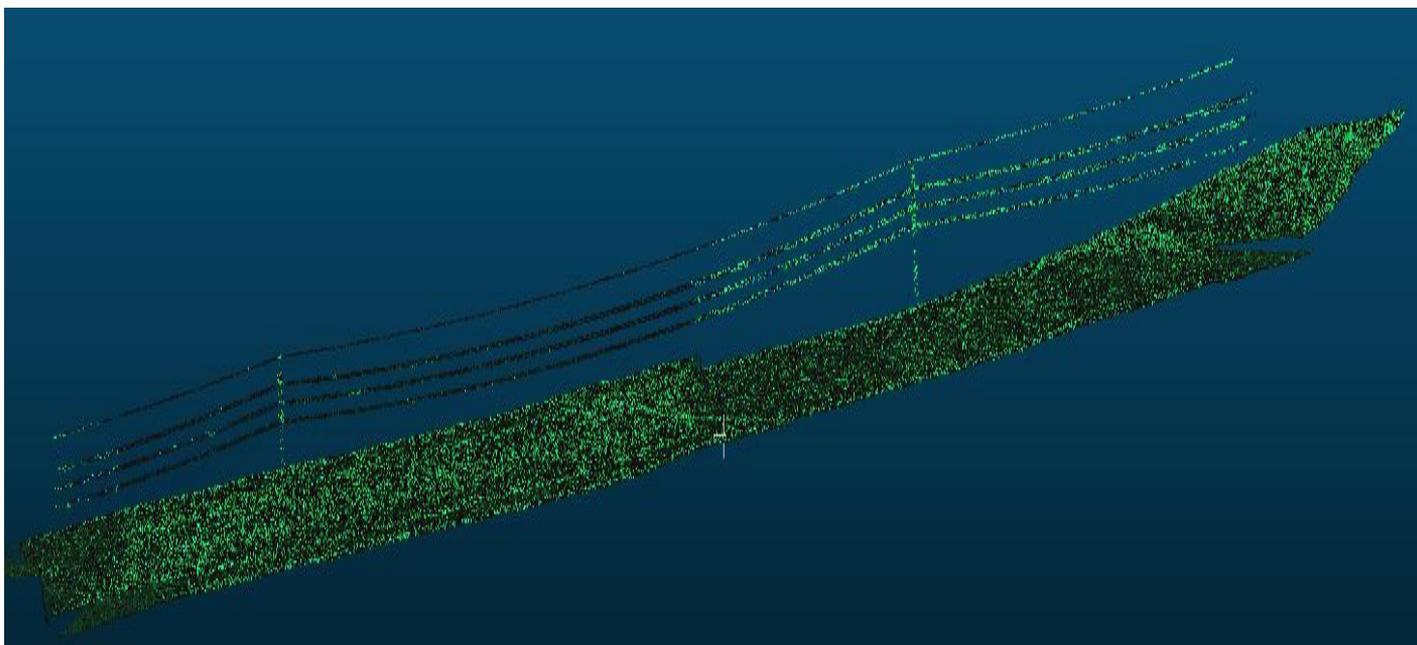


Figura 56: Histograma del Modelo sobre Alturas del Suelo.

Después de ejecutar todas las operaciones presentes en el script de *Python* (ver anexo 3), se es capaz de representar el modelo 3D (ver figura 57) creado a partir de las librerías *numpy* y *o3d*. Aunque toda la zona de estudio se visualice en el mismo color, queda claro que los dos elementos de interés son fácilmente distinguibles. Además, al comparar de manera visual este modelo con el obtenido en el apartado de la fotogrametría es obvio que la caracterización e identificación de los elementos se lleva a cabo de forma más fácil en este último producto.

Asimismo, comparando analíticamente ambos productos, se ratifica la información previa, dado que tanto el número total de puntos (23930584) como el número de caras (8676668) supera los máximos obtenidos en los dos proyectos del procesamiento fotogramétrico. A su vez, también se ha de comentar, que la cantidad de datos obtenidos en este producto son superiores a los conseguidos en investigaciones con objetivos similares (Heo et al., 2013 y Eulitz & Reiss, 2015).



*Figura 57: Modelo 3D de la zona de estudio.*

## 5. Conclusiones

Cabe recordar que el objetivo principal de esta investigación es evaluar la utilidad que muestran la fotogrametría y la teledetección LiDAR a la hora de caracterizar líneas y torres de alta tensión. Por lo tanto, después de analizar todas las figuras anteriormente mostradas, se afirma que se consiguen identificar y distinguir los elementos de interés en todos los productos; por lo que las dos técnicas presentadas cumplen el objetivo principal establecido. Sin embargo, algunos de los productos o resultados obtenidos presentan algún tipo de carencia (poca cantidad de puntos en los elementos de interés, por ejemplo) y, en consecuencia, quedaría comprobar la validez de otros parámetros para mejorarlos.

Además de la mencionada anteriormente, también se ha llegado a otra serie de conclusiones. En primer lugar, se ve claro que la calidad del material de partida es esencial a la hora de conseguir los resultados deseados. Después de llevar a cabo todo el proceso fotogramétrico, y visualizando los errores cometidos en él, se ha llegado a la conclusión de que se deben realizar tres vuelos diferentes que abarquen la misma zona: Uno visualizando el lateral izquierdo, otro el derecho (ambos formarían la visión oblicua) y otro con visión nadiral. Gracias a trabajar con diferentes ángulos, se consigue una visión más completa de la zona a representar, lo que ayudaría a crear la sensación de realce de los elementos de interés.

Además, también se ha visto que la correcta colocación y ubicación de los puntos de apoyo es esencial para llevar a cabo todo el proceso fotogramétrico. En este contexto, para poder adquirir información de máxima precisión y delimitar toda la zona de estudio, se deberían posicionar los puntos en la salida a campo distribuyéndolos de manera homogénea. A su vez, como ya se ha comentado en el apartado de los resultados, el procesamiento PPK ayudaría a alcanzar una mayor precisión en las posiciones de los elementos.

Aunque es cierto que la tecnología LiDAR muestra buenos resultados, también se ha recalcar que cuenta con una serie de limitaciones. Por ejemplo, sería conveniente que los datos de partida lleven incorporado el sistema de referencia con el que trabajan. De esta forma, se conseguiría determinar de forma precisa la zona en la que se realice el vuelo y se evitaría la incorrecta delimitación geográfica de dicho área.

Otra conclusión clave es que, para las características del trabajo analizado, donde se quieren caracterizar las líneas y torres eléctricas con información aérea, el mejor método de media es el de la tecnología LiDAR. Este hecho es visible tanto a nivel visual como en el número de puntos y caras en los modelos obtenidos a partir de ambas técnicas. Por si eso fuera poco, mediante la teledetección se consigue estimar uno de los factores claves del proyecto: la altura sobre el suelo de elementos de interés.

Por último, sería recomendable llevar a cabo un estudio en el que se investigue como afectan los diferentes parámetros de vuelo (altura de vuelo, tipo de sensor, ángulos de inclinación etc.) en la obtención de productos. De esta manera, realizando varias pruebas y variando los parámetros, se podrían comparar y evaluar todos los resultados obtenidos.

## 6. Bibliografía

- Alidoost, F., Arefi, H. (2017). Comparison of UAS-based photogrammetry software for 3d point cloud generation: A survey over a historical site. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(4W4), 55-61.
- Agisoft (2020). *Metashape. Intelligenet photogrammetry*.  
[https://www.agisoft.com/pdf/metashape\\_presentation.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape_presentation.pdf)
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2019). LAS Specification 1.4 - R15.
- Avian, M., Kellerer-Pirklbauer, A., Bauer, A. (2009). LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(4), 1087-1094.
- Axelsson, P.E. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, 110-117.
- Barbasiewicz, A., Widerski, T., Daliga, K. (2018). The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. *E3S Web of Conferences*, 26, 1-5.
- Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T., Bangash, H.A. (2014). Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69, 163-178.
- Bi, H., Zheng, W., Ren, Z., Zeng, J., Yu, J. (2016). Using an unmanned aerial vehicle for topography mapping of the fault zone based on structure from motion photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2495-2510.
- Burnham, C. (2019). A Study of UAV Photogrammetry Software, 1-12.
- Casson, B., Delacourt, C., Baratoux, D., Allemand, P. (2002). Seventeen years of the "La Clapière" landslide evolution analysed from ortho-rectified aerial photographs. *Engineering Geology*, 68(1-2), 123-139.
- Castanheira, G., Monteiro, M., Lobo, V. (2016). Unmanned aerial vehicles in the navy: its benefits. "Mircea cel Batran" *Naval Academy Scientific Bulletin*, 19(1), 39-43.
- Chen, B., Shi, S., Gong, W., Zhang, Q., Yang, J., Du, L., Sun, J., Zhang, Z., Song, S. (2017). Multispectral LiDAR point cloud classification: A two-step approach. *Remote Sensing*, 9(4), 1-17.
- Chen, Z., Gao, B., Devereux, B. (2016). State-of-the-art: DTM generation using airborne LIDAR data. *Sensors*, 17, 1-24.
- Chu, T., Guo, N., Backén, S., Akos, D. (2012). Monocular Camera/IMU/GNSS Integration for Ground Vehicle Navigation in Challenging GNSS Environments. *Sensors*, 12(3), 3163-3185.
- 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.
- Comba, L., Biglia, A., Ricauda, D., Gay, P. (2018). Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 84-95.
- Coromines, M., Blanco, E., Ruiz, A. (2005). Aplicación de la tecnología Lidar al estudio de la cubierta vegetal. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 19, 71-77.

- Dalponte, M., Bruzzone, L., Gianelle, D. (2008). Fusion of hyperspectral and LIDAR remote sensing data for classification of complex forest areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(5), 1416-1427.
- Davies, A.B., Asner, G.P. (2014). Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping. *Trends in ecology & evolution*, 29(12), 681-691.
- Debiasi, P., Mitishita, E.A. (2013). A influência da calibração aérea de uma câmara digital de baixo custo integrada com um sistema LIDAR no processamento de aerotriangulação. *Boletim de Ciências Geodesicas*, 19(4), 687-710.
- Elamin, E. (2013). A solution for exterior and relative orientation in photogrammetry, a genetic evolution approach. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 27(1), 108-113.
- Eulitz, M., Reiss, G. (2015). 3D reconstruction of SEM images by use of optical photogrammetry software. *Journal of Structural Biology*, 191(2), 190-196.
- Evans, J.S., Hudak, A.T., Faux, R., Smith, A.M.S. (2009). Discrete return lidar in natural resources: Recommendations for project planning, data processing, and deliverables. *Remote Sensing*, 1(4), 776-794.
- Forlani, G., Pinto, L., Roncella, R., Pagliari, D. (2013). Terrestrial photogrammetry without ground control points. *Earth Science Informatics*, 7(2), 71-81.
- Felipe, B., Hernández, D., Lerma, J.L. (2012). Analysis of the ground sample distance on large photogrammetric surveys. *Applied Geomatics*, 4(4), 231-244.
- Frey J., Kovach, K., Stemmler, S., Koch, B. (2018). UAV photogrammetry of forests as a vulnerable process. A sensitivity analysis for a structure from motion RGB-image pipeline. *Remote Sensing*, 10(6), 1-12.
- Gašparović, M., Seletković, A., Berta, A., Balenović, I. (2017). The evaluation Photogrammetry-based DSM from low-cost UAV by LiDAR-based DSM. *South-East European Forestry*, 8(2), 117-125.
- Granados, E. (2019). *Tipos de resolución en imágenes geoespaciales*. AlfaGeomatics. <https://alfageomatics.com/2019/09/tipos-de-resolucion-en-imagenes-geoespaciales/>
- Gurtner, W., Estey, L. (2007). RINEX The Receiver Independant Exchange Format. *IGS Workshop 2012*, 104, 1-74.
- Hackl, J., Adey, B.T., Woźniak, M., Schümperlin, O. (2017). Use of Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry to Obtain Topographical Information to Improve Bridge Risk Assessment. *Journal of Infrastructure Systems*, 24(1).
- Hackvello, M.G., Cannon, M.E., Lachapelle, G. (2003). Benefits of Using a Tactical-Grade IMU for High-Accuracy Positioning. *NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation*, 51(1), 1-12.
- Heo, J., Jeong, S., Park, H-K., Jung, J., Han, S., Hong, S., Sohn, H-G. (2013). Productive high-complexity 3D city modeling with point clouds collected from terrestrial LiDAR. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 26-38.
- Hosseinyalamdary, S. (2018). Deep Kalman Filter: Simultaneous Multi-Sensor Integration and Modelling; A GNSS/IMU Case Study Siavash. *Sensors*, 18(5), 1-15.
- Isenburg, M. (2013). LASzip: Lossless compression of lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 79(2), 209-217.

- Jeong, G.Y., Nguyen, T.N., Tran, D.K., Hoang, T.B.H. (2019). Applying unmanned aerial vehicle photogrammetry for measuring dimension of structural elements in traditional timber building. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 153, 1-13.
- Jutzi, B., Gross, H. (2009). Normalization of lidar intensity data based on range and surface incidence angle. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38(3/W8), 213-218.
- Karwel, A.K., Ewiak, I. (2012). Estimation of the Accuracy of the Srtm Terrain Model on the Area of Poland. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(7), 51-55.
- Koshaev, D.A. (2015). Redundancy and Lack of Information in Specific Problems of GNSS Measurement Processing. *Gyroscopy and Navigation*, 6(3), 172-187.
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry Geometry from Images and Laser Scans*. De Gruyter.
- Kwong, I.H.Y., Fung, T. (2020). Tree height mapping and crown delineation using LiDAR, large format aerial photographs, and unmanned aerial vehicle photogrammetry in subtropical urban forest. *International Journal of Remote Sensing*, 41(14), 5228-5256.
- Lee, J.H., Sull, S. (2019). Regression Tree CNN for Estimation of Ground Sampling Distance Based on Floating-Point Representation. *Remote Sensing*, 11(19), 1-17.
- Li, X., Liu, C., Wang, Z., Xie, X., Li, D., Xu, L. (2020). Airborne LiDAR: state-of-the-art of system design, technology and application. *Measurement Science and Technology*, 32, 24.
- Lorite, S., Ojeda, J.C., Rodríguez, B., González, E., Muñoz, P. (2015). Procesado y distribución de nubes de puntos en el proyecto PNOA-Lidar.
- Lowe, D. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91-110.
- Magnier, V., Gruyer, D., Godelle, J. (2017). Automotive LIDAR objects detection and classification algorithm using the belief theory. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 4, 756-751.
- Mallet, C., Bretar, F. (2009). Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), 1-16.
- Niederheiser, R., Mokroš, M., Lange, J., Petschko, H., Petschko, G., Elberink, S.O. (12-16 de julio de 2016). *Deriving 3D point clouds from terrestrial photographs - Comparison of different sensors and software*. XXIII ISPRS Congress, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague, Czech Republic.
- Niemeyer, J., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2014). Contextual classification of lidar data and building object detection in urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 152-165.
- Ormeño, S. (2004). Modelos Digitales Superficiales: Obtención y características. Universidad Politécnica-Madrid.
- Pérez, I. J. (2005). Ortofoto verdadera (true-ortho) y lidar, el posible futuro de la cartografía catastral urbana. *CT:Catastro*, 53, 131-154.

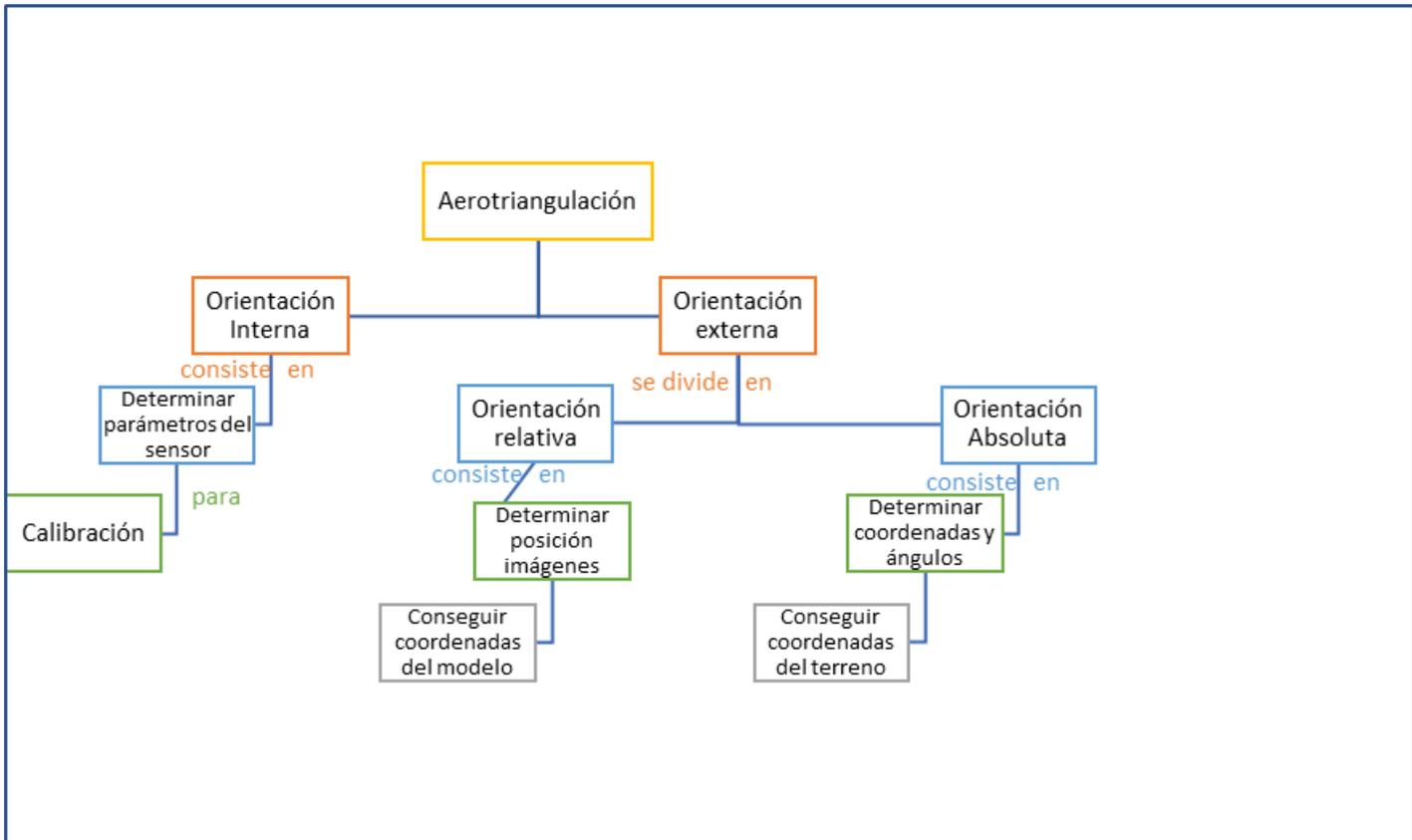
- Pirotti, F., Taolli, P. (2010). Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction. *Hydrological Processes*, 24(9), 1187-1197.
- Polat, N., Uysal, M. (2015). Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 63, 61-68.
- Polat, N., Uysal, M. (2017). DTM generation with UAV based photogrammetric point cloud. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(4W6), 77-79.
- Qin, X., Wu, G., Ye, X., Huang, L., Lei, J. (2017). A Novel Method to Reconstruct Overhead High-Voltage Power Lines Using Cable Inspection Robot LiDAR Data. *Remote Sensing*, 9(7), 1-21.
- Renslow, M., Greenfield, P., Guay, T. (2000). *Evaluation of multi-return LIDAR for forestry applications*. The Inventory & Monitoring Steering Committee.
- Reutebuch, S.E., Andersen, H.E., McGaughey, R.J. (2005). Light detection and ranging (LIDAR): An emerging tool for multiple resource inventory. *Journal of Forestry*, 103(6), 286-292.
- Risbøl, O., Gustavsen, L. (2018). LiDAR from drones employed for mapping archaeology -Potential, benefits and challenges. *Archaeological Prospection*, 25(4), 329-338.
- Rizaldy, A., Firdaus, W. (2012). Direct georeferencing: A new standard in photogrammetry for high accuracy mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 5-9.
- Santamaría, J., Sanz, T. (2011). Fundamentos de fotogrametría. Universidad de La Rioja.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J.H., Rodríguez-Pérez, J.R., Ordóñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10), 1-19.
- Shakhatreh H., Sawalmeh, A.H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N.S., Khreishah, A., Guizani, M. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access*, 7, 48572-48634.
- Shashi, M., Jain, K. (2007). Use of photogrammetry in 3d modeling and visualization of buildings. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2), 37-40.
- Smeckaert, J., Mallet, C., David, N., Chehata, N., Ferraz, A. (2013). Large-scale classification of water areas using airborne topographic lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 138, 134-148.
- Semyonov, D. (3 de mayo de 2011). Algorithms used in Photoscan [Publicación en un foro online]. Mensaje publicado en <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=89.0>
- Stal, C., Tack, F., de Maeyer, P., de Wulf, A., Goosens, R. (2011). Airborne photogrammetry and lidar for DSM extraction and 3D change detection over an urban area - a comparative study. *International Journal of Remote Sensing*, 34(4), 1087-1110.
- Stebler, Y., Guerrier, S., Skaloud, J., Victoria-Feser, M.P. (20-23 de septiembre de 2011). *Improving Modeling of MEMS-IMUs Operating in GNSS-denied Conditions*. 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2011, ION GNSS 2011. Oregon Convention Center, Portland, Oregon.
- Sun, R., Zhang, W., Zheng, J., Ochieng, W.Y. (2020). GNSS/INS Integration with Integrity Monitoring for UAV No-fly Zone Management. *Remote Sensing*, 12(524), 1-22.

- Tao, W., Lei, Y. (15-17 de julio de 2011). *UAV aerotriangulation with flight-control data support*. 2011 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE 2011 – Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Inner Mongolia, China.
- Tinkham, W.T., Huang, H., Smiths, A.M.S., Shrestha, R., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., Link, E.L., Glenn, N.F., Marks, D.G. (2011). A Comparison of two open source LiDAR surface classification algorithms. *Remote Sensing*, 3(3), 638-649.
- Tinkham, W.T., Swayze, N.C. (2021). Influence of agisoft metashape parameters on uas structure from motion individual tree detection from canopy height models. *Forests*, 12(2), 1-14.
- Tonkin, T.N., Midgley, N.G. (2016). Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 8(6), 16-19.
- Turner, D., Lucieer, A., Watson, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SFM) point clouds. *Remote Sensing*, 4(5), 1392-1410.
- UNCPBA (2012). Resoluciones en Teledetección. *Curso sensores remotos 2012 (1-5)*. Facultad de Ciencias Exactas Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Ussyshkin, V., Theriault, L. (2011). Airborne lidar: Advances in discrete return technology for 3D vegetation mapping. *Remote Sensing*, 3(3), 416-434.
- Verhoeven, G. (2011). Taking computer vision aloft - archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photostan. *Archaeological Prospection*, 18(1), 67-73.
- Volakis, J.L., O'Brien, A.J., Chen, C-C. (2016). Small and Adaptive Antennas and Arrays for GNSS Applications. *Proceedings of the IEEE*, 104(1), 1221-1232.
- Wang, A., Wang, M., Wu, H., Jiang, K., Iwahori, Y. (2020). A novel LiDAR data classification algorithm combined capsnet with resnet. *Sensors*, 20(4), 1-20.
- Weitkamp, C. (2005). *Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer.
- Wierzbicki, D., Kedzierski, M., Fryskowska, A. (2015). Assesment of the influence of UAV image quality on the orthophoto production. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1W4), 1-8.
- Wu, J., Xu, H., Zheng, J. (16-19 de octubre de 2017). *Automatic background filtering and lane identification with roadside LiDAR data*. IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Yokohama, Japan.
- Yan, L., Wan, J., Sun, W., Fan, S., Yan, Y., Chen, R. (2016). A novel absolute orientation method using local similarities representation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(8), 1-15.
- Zhang, Y., Yuan, X., Fang, Y., Chen, S. (2017). UAV low altitude photogrammetry for power line inspection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(1), 1-17.
- Zhang, X., Zhang, Y., Zhu, F. (2020). A method of improving ambiguity fixing rate for post-processing kinematic GNSS data. *Satellite Navigation*, 1(1), 1-13.

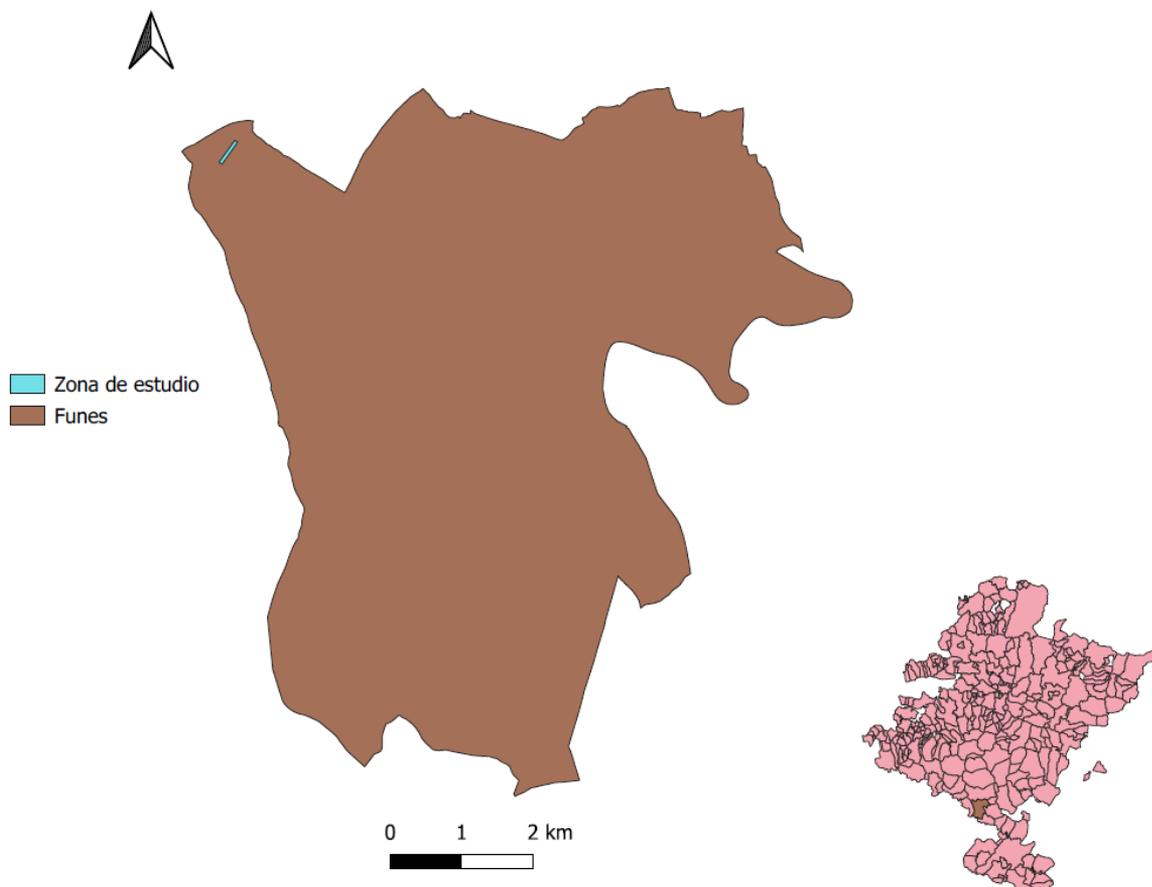
Žíhlník, Š., Chudý, F., Kardoš, M. (2007). Utilization of digital photogrammetry in forestry mapping. *Journal of Forest Science*, 53(5), 222-230.

## 7. ANEXOS

### ANEXO 1: Diagrama de flujo de la aerotriangulación



## ANEXO 2: Mapa de ubicación de la zona de estudio



### ANEXO 3: Script de Python para la construcción del modelo 3d

```
In [1]: import numpy as np
import open3d as o3d

In [2]: pcd = o3d.io.read_point_cloud("C:\\python_lidar\\merge_azagra\\merge_2.xyz")

In [3]: pcd
Out[3]: PointCloud with 23970584 points.

In [5]: o3d.visualization.draw_geometries([pcd])
[Open3D WARNING] [ViewControl] SetViewPoint() failed because window height and width are not set.

In [6]: pcd.estimate_normals()

In [7]: distances = pcd.compute_nearest_neighbor_distance()

In [8]: avg_dist = np.mean(distances)

In [9]: radius = 1.5 * avg_dist

In [10]: mesh = o3d.geometry.TriangleMesh.create_from_point_cloud_ball_pivoting(pcd,o3d.utility.DoubleVector([radius, radius * 2]))

In [11]: mesh
Out[11]: TriangleMesh with 23970584 points and 8676668 triangles.

In [12]: output_path="C:\\python_lidar_2\\merge/"

In [13]: o3d.io.write_triangle_mesh(output_path+"mesh.ply", mesh)
Out[13]: True

In [14]: def lod_mesh_export(mesh, lods, extension, path):
mesh_lods={}
for i in lods:
    mesh_lod = mesh.simplify_quadric_decimation(i)
    o3d.io.write_triangle_mesh(path+"lod_"+str(i)+extension, mesh_lod)
    mesh_lods[i]=mesh_lod
    print("generation of "+str(i)+" LoD successful")
return mesh_lods

In [ ]: my_lods = lod_mesh_export(mesh, [100000,50000,10000,1000,100], ".ply", output_path)
```