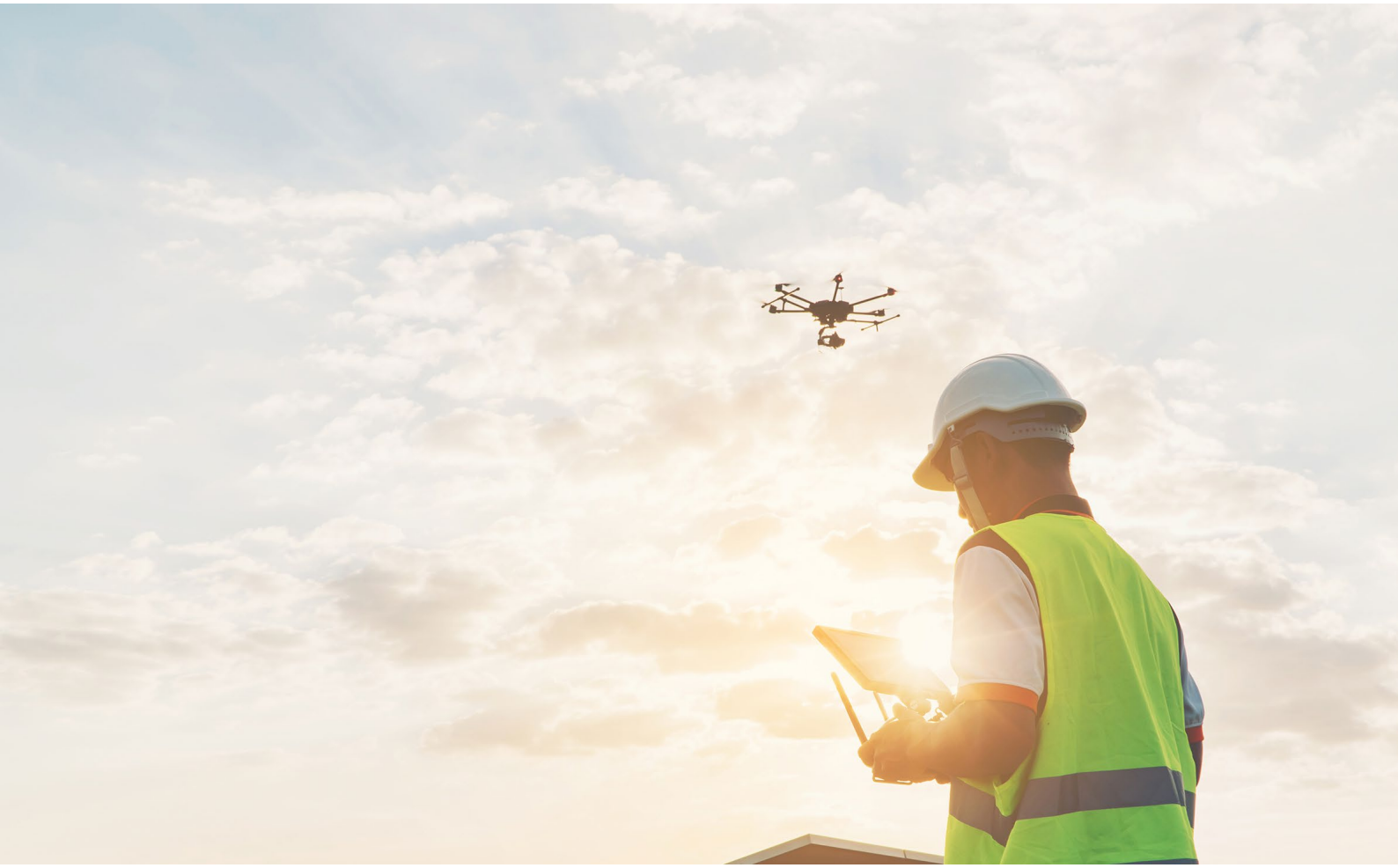
DRONES4VET

Co-funded by the European Union

MÓDULO 09

PROGRAMA DE FORMACIÓN

LIDAR



Comunidad de Madrid – Dirección General de Formación – CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, HACIENDA Y EMPLEO

DEX – Desarrollo de Estrategias Exteriores

CAMPUS DES MÉTIERS ET DES QUALIFICATIONS D'EXCELLENCE – Habitat, énergies renouvelables et éco-construction – Occitanie

MTU – Ollscoil Teicneolaíochta na Mumhan – Munster Technological University

BZB – Bildungszentren des Baugewerbes e.V.

fh KufsteinTirol – UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Índice

1. Objetivos del módulo **5**
2. Lidar Introducción **6**
2.1 ¿Qué es LIDAR ? 6
2.2 Tipos de LiDAR 8
Características principales de la exploración TLS y ALS 8
2.3 Componentes del sistema LiDAR (ALS) 11
3. Datos LIDAR **13**
3.1 Tipos de datos registrados durante la exploración LiDAR. 13
3.2 Formato y estructura de los datos 15
4. Aplicaciones LIDAR **17**
4.1 Levantamiento cartográfico e inspecciones/análisis de emplazamientos. 18
4.2 Topografía de alta densidad de follaje 19
Penetración de la cubierta vegetal con LIDAR 19
LiDAR multiespectral (MS LiDAR) 22
4.3 Inspecciones de seguridad y evaluaciones de la salud estructural 25
4.4 Modelización de inundaciones y evaluaciones de impacto ambiental 26
4.5 Gestión de servicios públicos e infraestructuras 27
5. Captura de campo LIDAR y metodología de procedimiento **28**
5.1 Hardware 28
5.2 Configuración previa al vuelo 31
5.3 Captura en vuelo y software de captura 34
5.4 Procesamiento & Software 36
5.5 Salida de datos 38
Lista de cuadros **40**
Cuadro de cifras **40**

DRONES4VET: participantes y autores del proyecto Erasmus+

Equipo CMQE HEREC Occitania Francia:
Régis Lequeux – profesor e ingeniero en ingeniería civil, Lycée Dhuoda, Nîmes – coordinador de los 10 módulos
Nicolas Privat - profesor e ingeniero en ingeniería civil, Lycée Dhuoda, Nîmes
Eric Remola – profesor de ingeniería civil, Lycée Dhuoda, Nîmes
Nicolas Vassart - profesor y doctor en ingeniería civil, Lycée Dhuoda, Nîmes
Valerie Poplin - Directora ejecutiva de CMQE

Equipo MTU Irlanda:
Sean Carroll, profesor, ingeniero civil
Michal Otreba Inz, profesor, ingeniero civil
coordinadores de "Sesiones de Nivelación y Seguimiento para formadores"

Universidad de Ciencias aplicadas. Kufstein Tirol. Austria
Emanuel Stocker, Profesor universitario en gestión de instalaciones y bienes raíces. Coordinador del manual.
Sarah Plank, Controlador de Investigación y Desarrollo

Equipo CRN Paracuellos (DG de Formación. Comunidad de Madrid) España.
Promotores del proyecto
José Manuel García del Cid Summers, Director
Daniel Sanz, director de Dron-Arena
Santos Vera, técnico
Jorge Gómez Sal, jefe de la unidad técnica
Fernando Gutiérrez Justo. Coordinador Erasmus

BZB Düsseldorf. Alemania
Frank Bertelmann-Angenendt, director de proyecto
Markus Schilaski, director de proyecto

DEX. España
Ainhoa Pérez
Ignacio Gómez Argüelles
Diego Díaz Mori
Yvan Corbat

1. Objetivos del módulo

Este módulo introducirá al alumno al campo de los ***LiDAR*** y cómo esta tecnología de teledetección puede utilizarse junto con UAS para capturar datos. Se identificará la ***terminología clave en relación con el escaneado*** LIDAR, así como los métodos principales para llevar a cabo un escaneado LiDAR. Un ***ejemplo ilustrado*** de los pasos necesarios para llevar a cabo con éxito un ***escaneo LiDAR*** utilizando un UAS se explica y cómo los datos resultantes pueden ser procesados. Por último, se exponen algunos ejemplos de las numerosas ***aplicaciones en el sector de la construcción*** para las que puede utilizarse esta tecnología junto con los UAS.

2. Lidar Introducción

2.1 ¿Qué es LIDAR?

LiDAR (light detection and ranging) es un método activo de teledetección que utiliza un láser o luz para medir objetos. En un sistema LiDAR, las distancias (o rangos) a un objeto se miden mediante pulsos de luz que se emiten desde un escáner láser de disparo rápido. Cuando un pulso de luz alcanza un objetivo, una parte de sus fotones se refleja en el escáner, donde puede medirse y registrarse. El "pulso" LiDAR se refiere a los fotones de luz emitidos y los que se reflejan de vuelta se denominan "***eco***" o "retorno". Los escáneres LiDAR pueden montarse en diferentes plataformas para las operaciones de escaneado, como trípodes o aeronaves (UAV, aviones, etc.), tal y como se ilustra en la figura 1.

Un sistema LiDAR mide la ubicación del escáner, la dirección o el ángulo de la luz emitida y el tiempo que tarda la luz en llegar al objeto y volver. Como se conocen la velocidad de la luz y la ubicación del escáner, el tiempo registrado desde la emisión de la luz (pulso) hasta el retorno reflejado (eco) puede utilizarse para calcular la ubicación tridimensional (coordenadas x,y,z) del objeto reflectante utilizando geometría básica. Durante un escaneado LiDAR, un láser puede emitir millones de pulsos de luz cronometrados que registran cuándo y dónde se reflejan, produciendo una nube de puntos 3D precisa del objeto o área objetivo. Estos datos se pueden utilizar para desarrollar modelos digitales que permitan estimar la estructura tridimensional del objeto o área de interés.

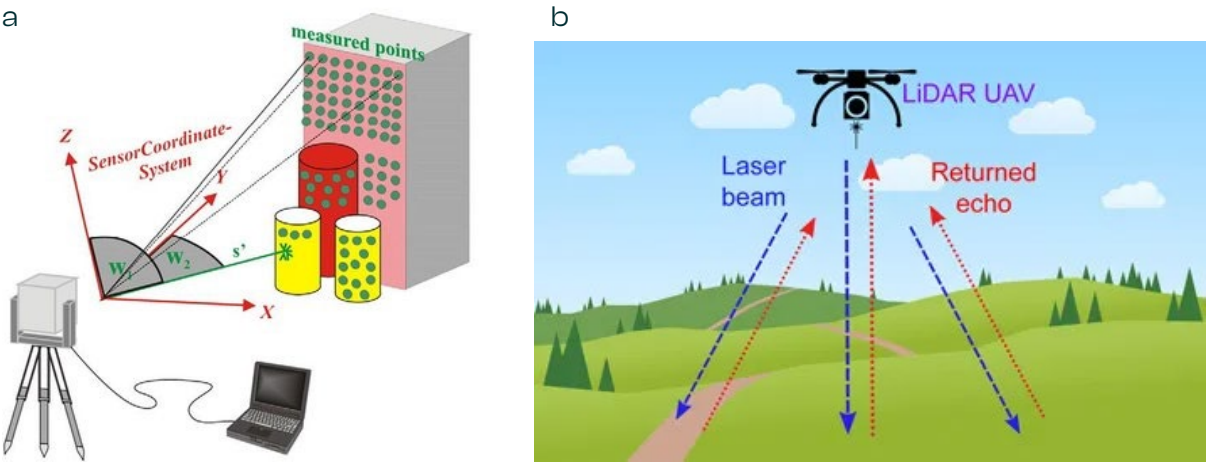


Figura 1 Escaneado LiDAR (a) Escáner láser terrestre sobre trípode[4] (b) Escaneado láser montado en UAV - escaneado láser aerotransportado[5].

El LiDAR, como técnica de teledetección, es un ejemplo de ***tecnología activa***, mientras que la fotografía aérea que puede utilizarse como parte de la fotogrametría se considera ***tecnología pasiva***. Esta distinción clave se debe a que la fotografía depende de la luz solar o de la radiación para reflejarse en un objeto externo, mientras que los

sistemas LiDAR emiten su propia radiación y miden cómo ésta se refleja en un objetivo. Por lo tanto, el uso de LiDAR no se limita a las horas de luz diurna y puede verse menos perturbado por los efectos ambientales.

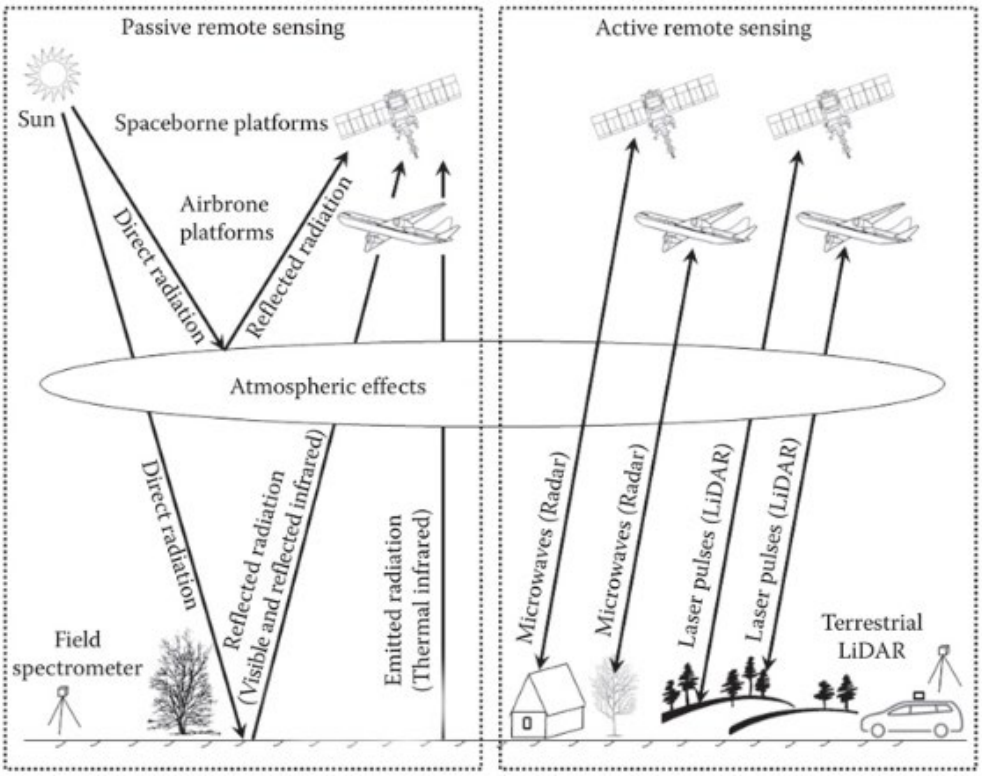


Figura 2 Teledetección pasiva y activa[3]

2.2 Tipos de LiDAR

Los LiDAR pueden clasificarse según la configuración y el funcionamiento del sistema. Algunos de los principales tipos son:

- Escaneado láser terrestre (***TLS***): es un sistema de escaneado láser que funciona sobre el terreno. Puede ser un sistema estático (es decir, montado sobre un trípode) o dinámico (vehículo/dispositivo móvil).
- LiDAR aerotransportado (***ALS): es*** un sistema de escaneado láser acoplado a una aeronave, como un UAV, un avión o un helicóptero.
- Batimétrico: es un tipo de escaneado láser que puede emplearse para penetrar en la superficie del agua (hasta aproximadamente 50 m en aguas claras).
- LiDAR por satélite: como su nombre indica, se trata de incorporar escáneres a satélites que no sólo pueden escanear la superficie terrestre, sino también la atmósfera.

Características principales de la exploración TLS y ALS

En el sector de la construcción, las dos principales técnicas de escaneado LiDAR que se emplean con frecuencia son ***TLS*** y ***ALS***, y ambas pueden utilizarse para capturar datos espaciales en 3D de la superficie terrestre y las estructuras. El escaneado láser terrestre in situ suele implicar la utilización de escáneres láser montados en superficie o sobre trípodes que se colocan estratégicamente alrededor del emplazamiento u objeto de interés y se desplazan según convenga después de cada escaneado. La figura 3 ilustra algunos de los componentes clave de un sistema de este tipo, que incluye un escáner capaz de girar 360 grados horizontalmente (es decir, gira sobre el eje vertical) y una fuente láser que emite luz rápidamente, la cual suele reflejarse en un espejo que gira 360 grados verticalmente (es decir, gira sobre el eje horizontal).

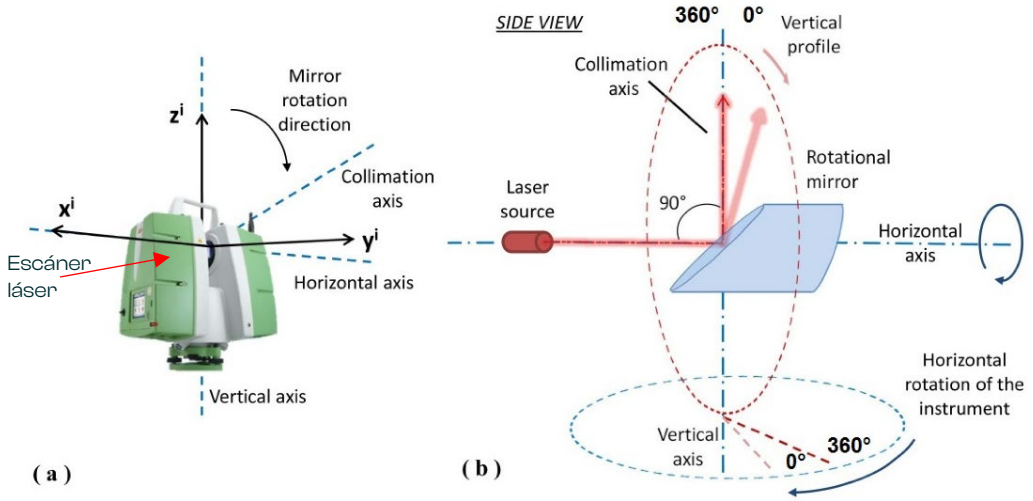


Figura 3 Componentes clave de un TLS montado sobre trípode (a) Escáner[6] (b) Espejo giratorio dentro del escáner[6]

El ALS consiste en montar escáneres láser en aviones, helicópteros o UAV. Estos escáneres emiten pulsos láser hacia el suelo y las señales reflejadas se utilizan para crear una nube de puntos 3D de la superficie y los objetos objetivo. La figura 4 ilustra

algunos de los componentes clave de los sistemas ALS, que incluyen una unidad de medición de la inercia (IMU) para seguir el movimiento de la aeronave (cabeceo, balanceo y guiñada) y una antena GNSS para registrar con precisión el posicionamiento (altitud y coordenadas X,Y). La sección 2.3 ilustra con más detalle los componentes clave de un sistema ALS.

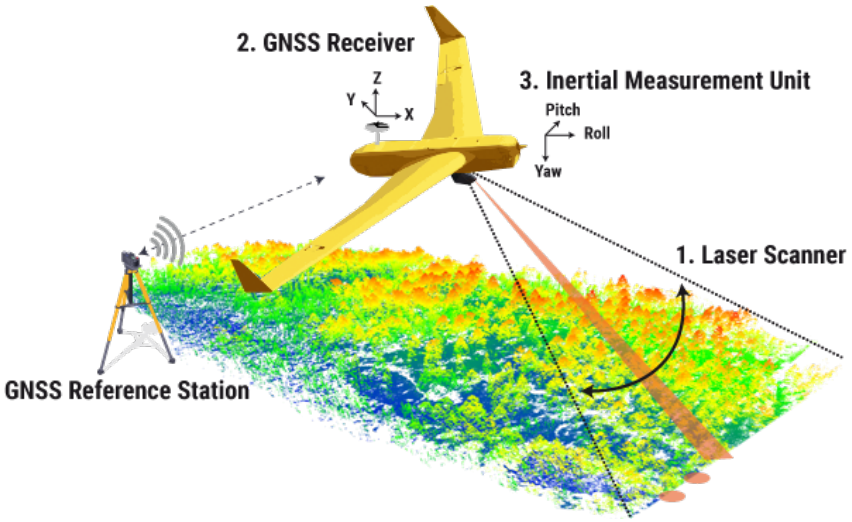


Figura 4 Componentes clave de un sistema ALS[16]

Los sistemas de escaneado láser TLS y ALS tienen cada uno sus propias ventajas en lo que respecta a la captura de datos espaciales tridimensionales. La Tabla 1 compara ambas metodologías de escaneado láser con algunos de los criterios clave a tener en cuenta antes de capturar datos espaciales sobre el terreno. También se identifican algunas de las aplicaciones típicas de cada método.

Tabla 1 Comparación de las técnicas TLS y ALS

	Escaneado láser terrestre (TLS)	**Escaneado láser aerotransportado (ALS)**
Ubicación/Plataforma	El TLS implica el uso de escáneres láser fijos que se instalan en el suelo o se montan sobre trípodes. Estos escáneres se colocan en posiciones específicas sobre el terreno o cerca de los objetos de interés.	El ALS consiste en montar escáneres láser en aeronaves como los UAS. Estos escáneres emiten pulsos láser hacia el suelo y las señales reflejadas se utilizan para crear una nube de puntos 3D de la superficie terrestre y los objetos.
Gama	Los escáneres láser terrestres suelen tener un alcance menor que los aéreos. Pueden capturar datos de alta densidad en un radio limitado, normalmente hasta un máximo de unos cientos de metros.	Los escáneres láser aerotransportados tienen un alcance mucho mayor que los terrestres, lo que les permite cubrir amplias zonas, normalmente varios kilómetros cuadrados, en un solo vuelo.
Resolución	Gracias a la gran proximidad al objetivo, TLS puede alcanzar una resolución de datos muy alta. Puede captar detalles finos de objetos y superficies con gran precisión.	Los datos ALS pueden tener menor resolución que los datos TLS porque el escáner captura los datos desde una mayor altitud, lo que supone una mayor huella para cada pulso láser. Los avances en la tecnología permiten ahora una mayor resolución, pero hay que lograr un equilibrio entre la intensidad o la resolución de la exploración y el área que debe cubrirse.
Aplicaciones	El TLS se utiliza habitualmente para la topografía de áreas pequeñas y medianas, el modelado detallado de estructuras, los yacimientos arqueológicos, la supervisión de la construcción y las aplicaciones industriales, entre otras.	El ALS de ala fija es ideal para cartografía a gran escala, inventario forestal, planificación del uso del suelo, modelado de inundaciones, cartografía topográfica y otras aplicaciones que requieren una amplia cobertura de áreas extensas. El ALS multirrotor es ideal para la supervisión de obras y la gestión de activos, entre otras.
Velocidad de recogida de datos	La recogida de datos TLS es más lenta en comparación con el escaneado láser aerotransportado, ya que cada posición de escaneado debe configurarse y procesarse individualmente.	El ALS puede cubrir grandes áreas rápidamente, lo que lo convierte en un método eficaz para la adquisición de datos en paisajes extensos.

A efectos de este módulo de formación, sólo se consideran los requisitos y características específicos de los sistemas ELA para el resto de este módulo.

2.3 Componentes del sistema LiDAR (ALS)

En muchas operaciones de escaneado láser, el sistema LiDAR se monta en una aeronave o UAV. Los componentes clave de un sistema de este tipo se destacan en la Figura 6 e incluyen:

- Sensor LiDAR: El sensor LiDAR dispara impulsos en bandas cercanas al infrarrojo mientras la aeronave vuela. La figura 5 ilustra las longitudes de onda del espectro electromagnético.

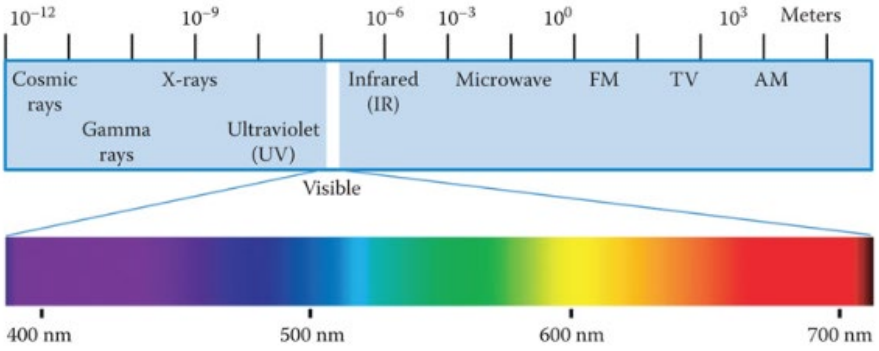


Figura 5 Espectro electromagnético[3]

- Receptores GPS: Los receptores GPS rastrean la altitud y la ubicación de la aeronave o UAV para poder establecer un posicionamiento preciso de la aeronave para el procesamiento de datos.
- Unidades de medición inercial (IMU): La IMU rastrea el cabeceo, balanceo y guiñada de la aeronave para poder establecer una medición precisa del movimiento de la aeronave y la emisión/retorno de los pulsos láser.

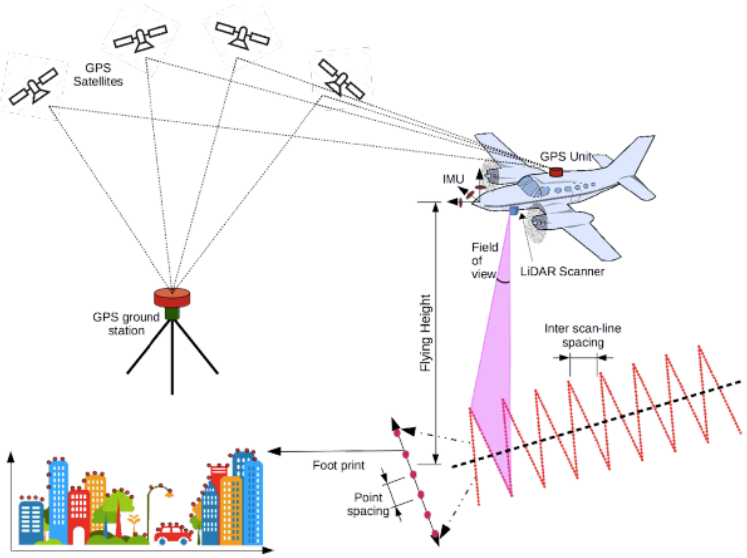


Figura 6 Componentes del ELA[13]

- Grabadores de datos o CPU: Una CPU a bordo registra toda la información de los impulsos que luego se traducen en ubicaciones exactas (x,y,z).

Cuando las operaciones cartográficas se llevan a cabo en zonas extensas, es habitual emplear aeronaves de ala fija o UAV. Sin embargo, cuando se trata de escanear áreas más pequeñas u objetos/estructuras específicos, suelen emplearse UAV multirotor.

Figura 7 Muti Rotar DJI M300 con escáner láser L1[17]

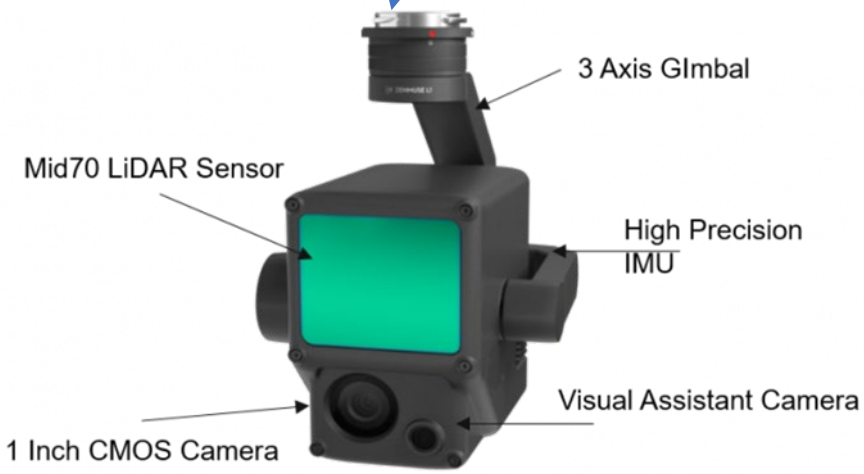


Figura 8 Muti Rotar DJI M300 con escáner láser L1[17]

Figura 9 L1 Escáner láser Zenmuse DJI[10]

3. Datos LIDAR

3.1 Tipos de datos registrados durante la exploración LiDAR.

Durante un escaneo LiDAR, se pueden capturar varios tipos diferentes de datos (mediciones de campo, metadatos, etc.) para ayudar a crear y complementar una representación 3D precisa del área de escaneo o del objeto. Mientras que los tipos de datos pueden variar dependiendo de la aplicación y el tipo de escáner, algunos de los tipos de datos más comunes se identifican en la Figura 9 y la Tabla 2 a continuación:

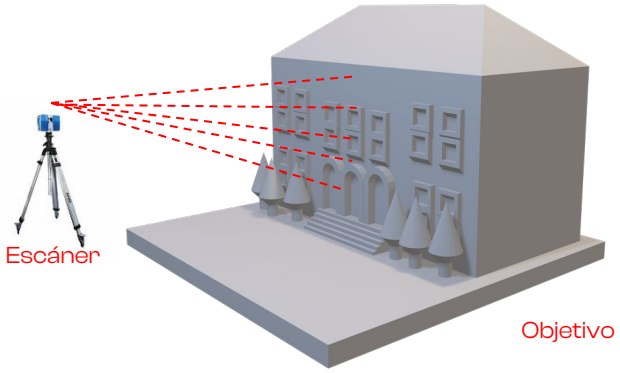


Figura 10 Tipos de datos LiDAR

	Escáner	Objetivo
Medición sobre el terreno	Distancia Tamaño de Pulso Ángulos verticals y Horizontales	Posición (X,Y,Z) Intensidad (I) Color (RGB)
Metadatos	Momento de la captura Condiciones medioambientales Detalles de calibración Información sobre el proveedor de servicios	Nombre del proyecto/Localización Red de control Inteligencia empresarial

Tabla 2 Tipos de datos y parámetros LIDAR

Tipos de datos	Descripción
Datos de nubes de puntos	El resultado fundamental de un escaneado LiDAR es una nube de puntos. Cada punto de la nube de puntos representa una ubicación específica en el entorno espacial 3D. En conjunto, estos puntos forman un modelo 3D de la superficie, área u objeto escaneado.
Parámetros de exploración	Los ajustes de escaneado del sistema LiDAR tienen una influencia significativa en la calidad, resolución y precisión del escaneado. Normalmente se registran parámetros como la frecuencia de pulso (pulso/seg) y la resolución de escaneado.
Datos de posición GPS	Los sistemas LiDAR registran las coordenadas geográficas (latitud, longitud) y la elevación (altitud) del punto de origen y de retorno de cada pulso láser. Esta información permite calcular distancias con precisión y posicionarse en el mundo real.
Datos de intensidad	La intensidad es una medida de la fuerza de retorno del impulso láser que generó el punto. Cada retorno o eco láser tiene un valor de Intensidad que puede proporcionar información adicional sobre la reflectividad o las propiedades del material de las superficies, lo que ayuda a distinguir entre diferentes superficies.
Datos RGB	Muchos sistemas LiDAR están equipados con cámaras que capturan imágenes en color o datos RGB. Los datos RGB pueden incrustarse con la nube de puntos para crear una representación 3D visualmente realista y coloreada del objeto o área escaneados....
Datos de clasificación	Los puntos de una nube de puntos pueden clasificarse en función de los objetos o la superficie de la que proceden (por ejemplo, suelo, agua, edificio, etc.), lo que puede ayudar al análisis de los datos y a su interpretación durante el procesamiento.
Número de devolución y número de devoluciones	Cada pulso láser puede dar lugar a múltiples retornos si interactúa con varias superficies. El número de retorno indica de qué retorno se trata (primero, segundo, etc.), y el número de retornos indica cuántos retornos se registraron para ese pulso.
Datos de calibración:	Algunos sistemas LiDAR capturan información de calibración, que ayuda a corregir las imperfecciones del sensor y a optimizar la precisión de la nube de puntos.

3.2 Formato y estructura de los datos

Existen varios formatos de archivo de nubes de puntos en los que se pueden codificar los datos lidar, como LAS (.las), LAZ (.laz) y E57, que se encuentran entre los más comunes. El formato LAS es el empleado por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS). Independientemente del formato de archivo que se elija, la gran mayoría son, en última instancia, algunas variaciones del esquema XYZ-I-RGB posición-intensidad-color, como se destaca en la figura 10. El formato LAS suele ser el estándar del sector para almacenar datos LiDAR aerotransportados y se utiliza habitualmente para aplicaciones SIG. El formato E57 tiene aplicaciones más amplias para el escaneado láser, ya que permite almacenar imágenes y metadatos con la nube de puntos. Ambos formatos pueden convertirse a otros formatos como .TXT o Shapefiles. Los datos de nubes de puntos LiDAR pueden contener una "clasificación de devoluciones", que ayuda al usuario final a determinar el tipo de objeto escaneado, por ejemplo, suelo, edificios o agua. Esto puede permitir otros modelos de datos como MDS y MDT.

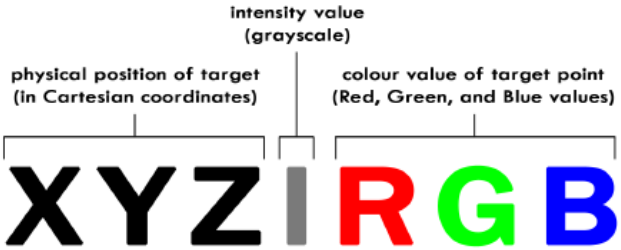


Figura 11 Formatos de datos LiDAR[8]

Aunque existen varias soluciones de hardware y software propias que pueden convertir los datos LiDAR en multitud de formatos de datos, es importante que quienes adquieran datos LiDAR determinen qué formato de archivo garantizará la mejor integración de los datos en los sistemas existentes (como los sistemas de gestión de activos) para asegurar la interoperabilidad.

Con respecto al tipo de formato LAS, la información más importante que describe cada pulso se clasifica en X, Y, Z, I, N, R, C. Los parámetros son los siguientes

- X, Y y Z son las coordenadas de las ubicaciones de los ecos.
- I indica la intensidad o fuerza del eco.
- N representa el número de retornos (ecos) recibidos de un solo pulso y
- R indica el orden de estos ecos, o el número de retorno. Por ejemplo, una combinación de N = 2 y R = 1 indica que se registraron dos ecos de este pulso (N = 2) de los cuales este registro es el primero (R = 1). Es habitual que los ecos de los datos públicos se clasifiquen en categorías.
- La columna C indica estas categorías para esta clasificación.[8]

X	Y	Z	I	N	R	C
597847.589	7336016.990	329.020	1	3	1	3
597847.290	7336017.230	325.050	1	3	2	3
597846.979	7336017.490	320.780	1	3	3	1
597845.609	7336017.429	319.820	14	1	1	1
597842.969	7336017.230	319.330	18	1	1	2
597840.359	7336017.009	319.060	17	1	1	2
597838.520	7336016.200	328.500	8	1	1	1
597836.849	7336016.370	323.710	5	2	1	3
597836.469	7336016.660	318.960	0	2	2	2

Figura 12 Formato de datos LiDAR LAS (las)[8]

4. Aplicaciones LIDAR

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con tecnología LiDAR han encontrado numerosas aplicaciones en los sectores de la construcción y la ingeniería civil. En comparación con otras aeronaves como helicópteros o aviones, el escaneado con UAV puede ofrecer ventajas significativas en términos de eficiencia, precisión y rentabilidad. En la siguiente sección se identifican algunos ejemplos de las novedosas formas en que se está utilizando LiDAR con UAV para aplicaciones de construcción e ingeniería civil. No se trata de una lista exhaustiva y cabe señalar que el LiDAR UAV está siendo adoptado por muchos sectores distintos al de la construcción. La combinación de UAV y tecnología LiDAR proporciona a los profesionales de la construcción y la ingeniería civil datos muy precisos, actualizados y de fácil acceso. Esto permite tomar mejores decisiones, mejorar la gestión de proyectos y aumentar la seguridad en una amplia gama de aplicaciones del sector.

4.1 Levantamiento cartográfico e inspecciones/análisis de emplazamientos.

Los UAV LiDAR pueden crear mapas topográficos de obras de construcción con rapidez y precisión. Estos datos ayudan a ingenieros y planificadores a comprender el terreno, las estructuras existentes y la vegetación. Ayuda en la selección del emplazamiento, la planificación y el diseño de proyectos de infraestructuras. Los drones equipados con LiDAR pueden realizar cálculos volumétricos precisos de acopios, excavaciones y vertederos. Esta información es crucial para la gestión de proyectos, el seguimiento del progreso y la gestión de las cantidades de material. Las exploraciones LiDAR periódicas de una obra pueden proporcionar información en tiempo real sobre el progreso del proyecto. Esto ayuda a identificar retrasos, resolver problemas y mantener los plazos del proyecto. Durante la construcción, los UAV LiDAR pueden utilizarse para capturar el estado de construcción de un proyecto. Estos datos pueden compararse con los modelos de diseño, lo que ayuda a identificar desviaciones y garantizar que la construcción avanza según lo previsto.

Figura 13 Escaneo LIDAR del puerto [9]

4.2 Topografía de alta densidad de follaje.

Penetración de la cubierta vegetal con LIDAR

Para las aplicaciones LiDAR en áreas que tienen una alta densidad de follaje como los bosques, una parte significativa de los rayos LiDAR no viajan al nivel del suelo debido a las ramas, hojas y otros objetos que obstruyen el camino. Los LiDAR (rayos láser) no pueden penetrar a través de estos objetos. Los resultados de los escaneos LiDAR en tales áreas diferirán dependiendo de las estaciones del año (el invierno suele tener menos follaje - el escaneo LIDAR puede ser más exitoso, lo contrario es cierto para la primavera / verano allí donde hay un mayor follaje y los rayos no pueden viajar hasta el nivel del suelo).

Por lo tanto, cuando se consideran escaneos ALS con cobertura vegetal de alta densidad, el enfoque para los modelos de nubes de puntos, son los puntos que viajaron con éxito entre los objetos que alcanzan el nivel del suelo.

Cabe señalar que el ángulo de barrido es uno de los factores clave para el éxito de la misión. La figura siguiente presenta un ejemplo de penetración de impulsos láser en zonas boscosas considerando el campo de visión vertical. Como puede verse, algunos rayos láser penetran hasta el suelo, mientras que otros, sujetos a la densidad de la cobertura foliar, regresarán al LiDAR antes de alcanzar el suelo.

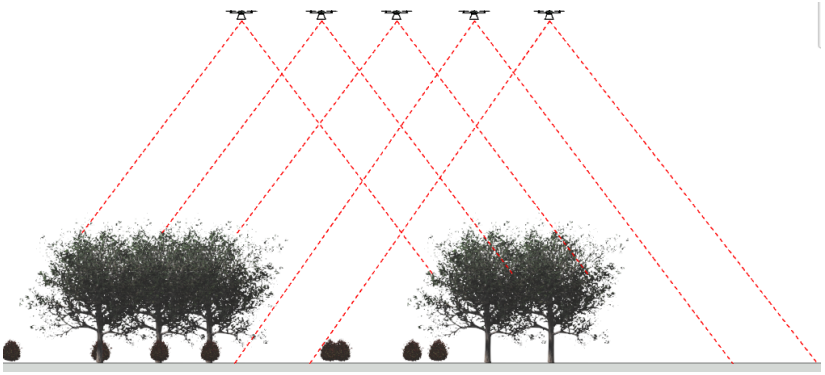


Figura 14 Ejemplo de penetración del rayo láser a través de árboles.

La figura siguiente muestra un ejemplo de exploración forestal con ALS.

Figura 15 Ejemplo de exploración forestal[9]

Para planificar misiones ALS como las descritas anteriormente, el piloto de un UAS debe tener en cuenta una serie de factores a la hora de seleccionar el equipo LIDAR y los ajustes de escaneado más adecuados en función del entorno:

1. **Frecuencia de repetición de impulsos**: número de impulsos de luz enviados desde el escáner LiDAR por segundo. Una mayor frecuencia de repetición de impulsos significa una mayor densidad de puntos de los datos LiDAR; mayor probabilidad de que los impulsos LiDAR atraviesen los huecos del follaje para medir la superficie del suelo.
2. **Campo de visión:** para aumentar la probabilidad de penetración del LIDAR a través del follaje,
   muchos escáneres tienen la capacidad de aumentar su campo de visión mediante la rotación vertical y horizontal del sensor durante una misión, en lugar de utilizar una posición estática del sensor.

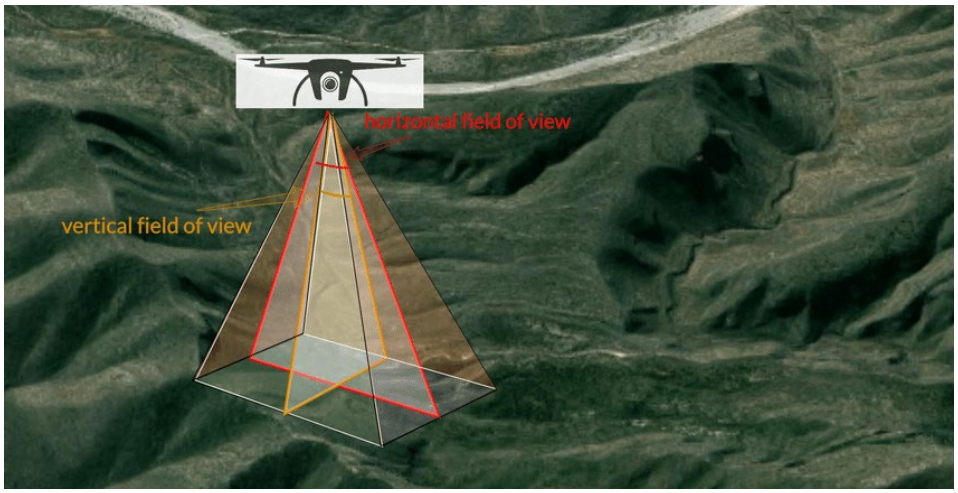


Figura 16 Campo de visión[19]

3. **Número de retornos (ecos) -** cada sensor LiDAR tiene la capacidad de detectar un número de ecos de retorno (después de golpear un objeto sólido) de cada pulso láser. Cuanto mayor sea el número de ecos de retorno detectados, mayor será la sensibilidad de alcance y aumentará la resolución de la estructura de la vegetación escaneada.
4. **Longitud de onda del láser -** hay dos longitudes de onda típicas utilizadas en la mayoría de las unidades LIDAR UAS: 905 y 1550 nm. La 1550 puede ser a menudo la opción más eficiente para escanear vegetación debido a su alta potencia láser que permite que el escaneo se produzca a gran altura (opción más segura para árboles altos y mayor espacio libre). También tiene un procesamiento más sofisticado, más retornos y menor ruido de datos. El 905nm funciona mejor en entornos más húmedos y mojados. El 905 debe seleccionarse para vegetación baja y terrenos más llanos.
5. **Divergencia del haz:** representa la divergencia de los fotones de un haz láser (en forma de cono) desde el sensor LIDAR. La siguiente figura muestra dos sensores LIDAR con diferente divergencia del haz.

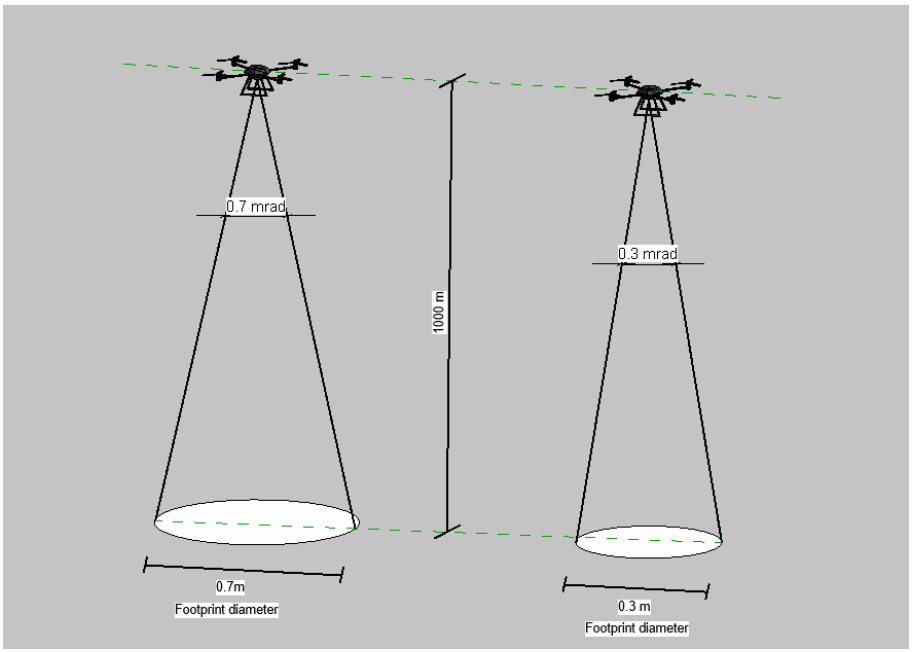


Figura 17 Diferentes ejemplos de divergencia del haz LIDAR (no a escala)

Como se ha mencionado anteriormente, la figura 13 presenta dos drones con sensores LIDAR de diferente divergencia del haz. También es crucial mencionar que cuanto menor sea la divergencia del haz, mayor será la precisión de la exploración.

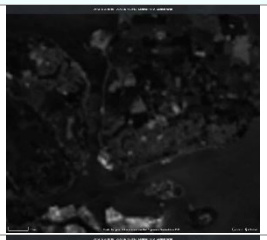
LiDAR multiespectral (MS LiDAR)

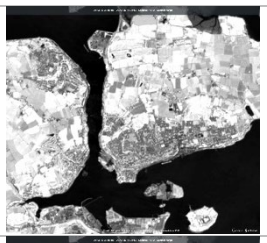
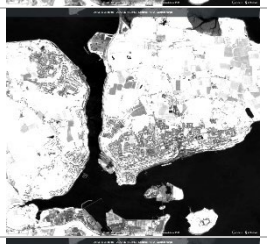
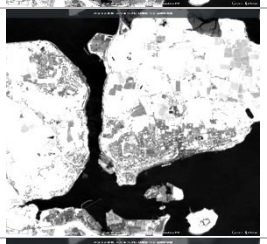
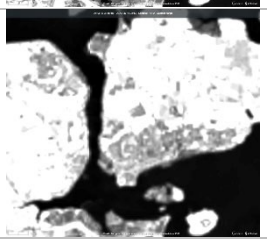
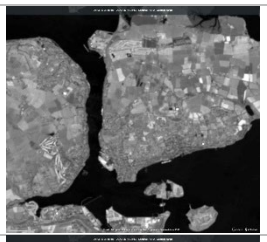
Cabe mencionar que el LIDAR está combinando recientemente sus capacidades con las imágenes multiespectrales. La tecnología multiespectral ya se utiliza ampliamente, como en el caso del satélite Sentinel-2. Las imágenes multiespectrales utilizan varias longitudes de onda para obtener imágenes en diferentes bandas del espectro luminoso. Esta técnica ayuda a determinar la cobertura del terreno, el tipo y las condiciones de la plantación.

En la vigilancia y gestión forestal, la cámara multiespectral puede ayudar a reconocer las especies arbóreas, su estado de salud y su biomasa.

Como se ha mencionado, hay varias bandas en las que este equipo puede operar:

Cuadro 3 Imágenes del satélite Sentinel-2 por longitud de onda/banda[20]

Bandas Sentinel-2	Longitud de onda central (micrómetros)	Ejemplo de imagen para el puerto de Cork
Banda 1 - Aerosol costero	0.443	
Banda 2 - Azul	0.490	
Banda 3 - Verde	0.560	
Banda 4 - Rojo	0.665	
Banda 5 - Vegetación Borde Rojo	0.705	

Banda 6 - Vegetación Borde Rojo	0.740	
Banda 7 - Vegetación Borde Rojo	0.783	
Banda 8 - NIR	0.842	
Banda 8A - Vegetación Borde Rojo	0.865	
Banda 9 - Vapor de agua	0.945	
Banda 10 - SWIR - Cirrus	1.375	N/A
Banda 11 - SWIR	1.610	
Banda 12 - SWIR	2.190	

Los sistemas MS LIDAR se combinarán para introducir la capacidad de obtención de imágenes en otras longitudes de onda.

El sistema Titan de Optech combina tres longitudes de onda[15] :

- Luz verde visible - 532 nm
- Infrarrojo cercano (NIR) - 1064 nm
- Infrarrojos (IR) - 1550 nm

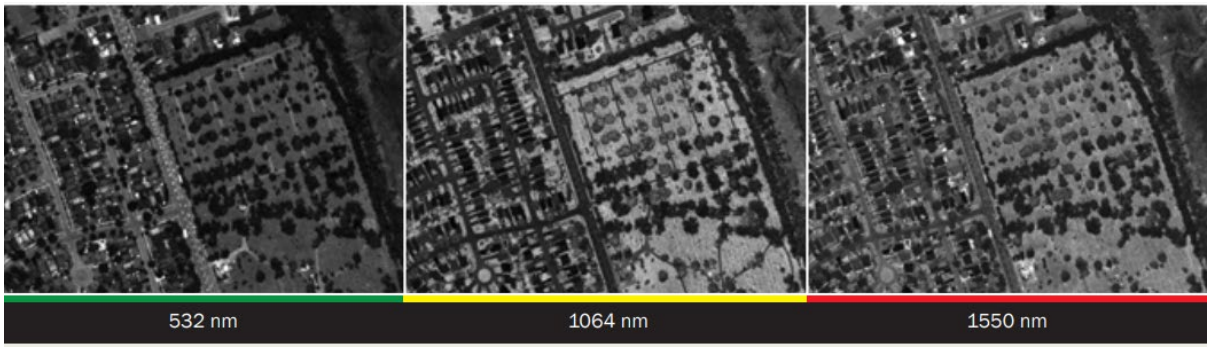


Figura 18 Ejemplo de imágenes MS LIDAR

4.3 Inspecciones de seguridad y evaluaciones de la salud estructural

Los drones equipados con LiDAR pueden evaluar el estado de estructuras existentes, como puentes y edificios. Al detectar deformaciones, grietas y otras anomalías, los ingenieros pueden tomar decisiones informadas sobre mantenimiento y reparaciones. Los drones con LiDAR pueden acceder a zonas de difícil acceso o peligrosas, reduciendo la necesidad de que el personal trabaje en entornos de riesgo. Esto es especialmente útil para inspeccionar estructuras altas o lugares con condiciones peligrosas. La siguiente figura muestra un ejemplo de escaneado de un puente Tower con la nube de puntos original procesada a la izquierda y un filtro de elevación aplicado en la imagen de la derecha.

Figura 19 Ejemplo de escaneado LIDAR del Tower Bridge UK[9]

4.4 Modelización de inundaciones y evaluaciones de impacto ambiental

Los datos de elevación generados por LiDAR son cruciales para crear modelos precisos de inundaciones y desarrollar estrategias eficaces de gestión de inundaciones. LiDAR puede captar con precisión la densidad de la vegetación y la cubierta terrestre. Esta información es útil para evaluar los impactos medioambientales, como el potencial de inundaciones, erosión y alteración del hábitat. Los datos LiDAR de los UAV pueden servir de apoyo a la planificación urbana y a los proyectos de desarrollo del suelo al proporcionar información precisa sobre el uso del suelo, las estructuras existentes y las características naturales.

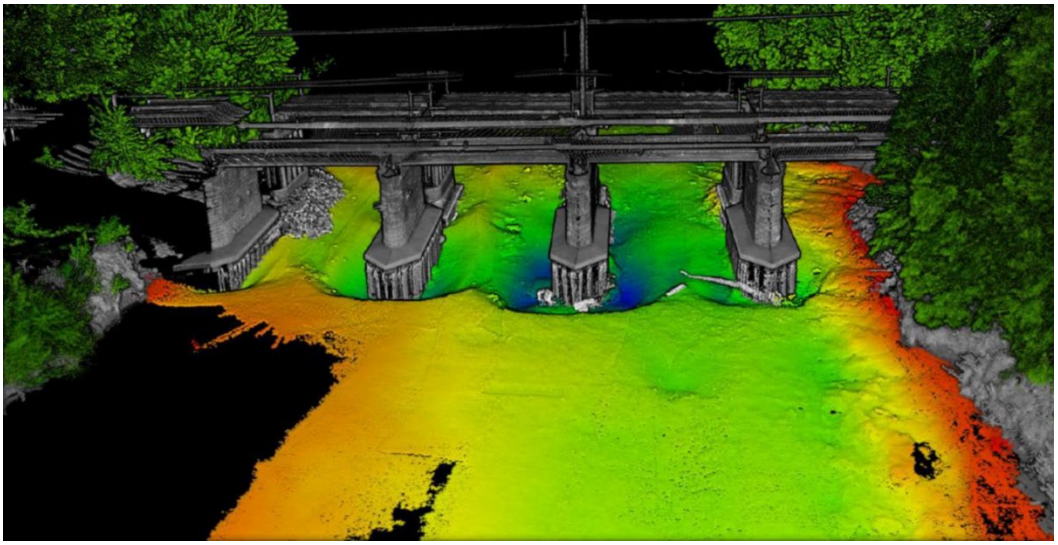


Figura 20 Ejemplo de escaneado LIDAR del río Eden[14]

4.5 Gestión de servicios públicos e infraestructuras

El LiDAR se utiliza para inspeccionar y cartografiar redes de servicios públicos, como líneas eléctricas y tuberías. Estos datos ayudan a planificar el mantenimiento, las mejoras y las ampliaciones.

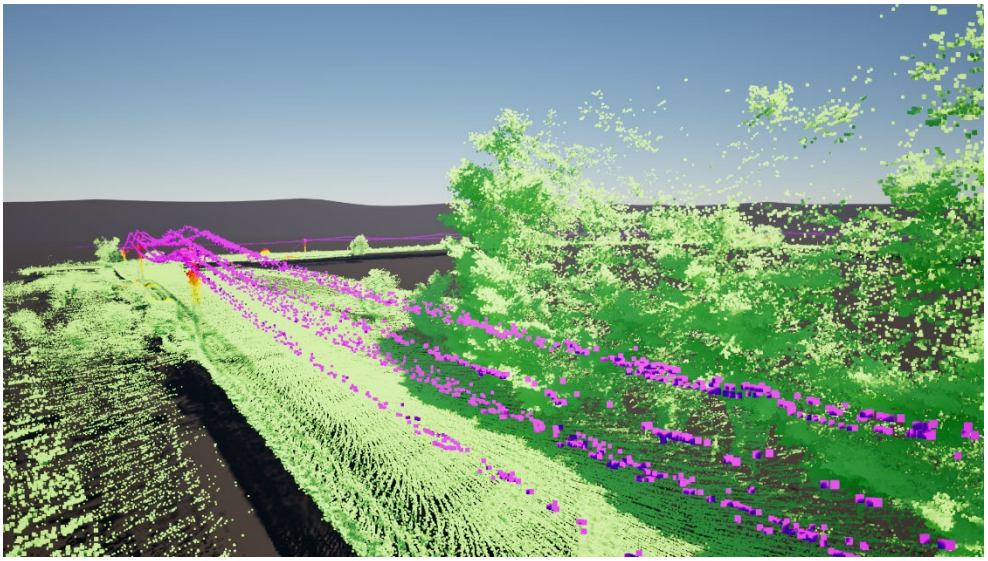


Figura 21 Ejemplo de análisis de líneas eléctricas [9]

5. Captura de campo LIDAR y metodología de procedimiento

Al considerar el uso de equipos LIDAR junto con UAV, el operador debe recordar planificar su misión en consecuencia, como se indica en el Módulo 2 "Planificación del vuelo y elaboración de informes" de este programa.

5.1 Hardware

Existen varias soluciones de sensores LiDAR disponibles en el mercado y, por lo general, la mayoría de los fabricantes de drones disponen de una solución LIDAR que integran en sus propios sistemas UAV.

Algunos de los más populares son los drones de DJI (por ejemplo, el M300 con solución LIDAR DJI Zenmuse L1), que suele venderse por unos 10.000 euros. Una vez más, es importante mencionar que esta industria está en constante cambio y la gama de soluciones es cada vez mayor.

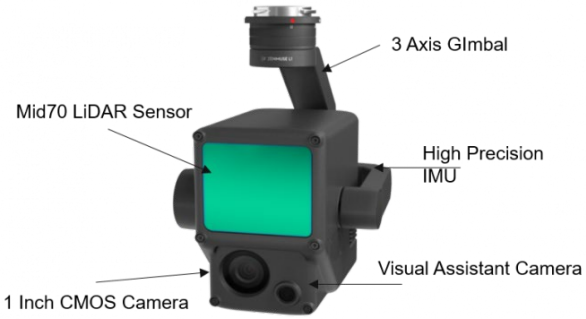


Figura 22 Ejemplo de equipo LIDAR para drones [10]

Es imprescindible seleccionar equipos cuyas propiedades se ajusten a los requisitos del tipo específico de misiones. En la siguiente tabla se identifican algunos de los parámetros clave a tener en cuenta para algunos de los sensores LiDAR más utilizados actualmente:

Cuadro 4 Comparación de los detalles de los sensores LIDAR[11]

Modelo	Roegl mini VUX-1DL [11]	Velodyne VLP-16[12]	Quanergy M8[13]	L1 Zenmuse DJI [14]
Longitud de onda (nm)	Infrarrojo cercano	903	905	905
Alcance de medición (m)	3-200	<100	0.3-200	190m@10%, 100klx ; 450m@80%, 0klx
Precisión (mm)	+15/10	+30	+30	30 @ 100 m
Máx. Frecuencia de repetición de impulsos (PRF) (Khz)	100	-	-	200
Máx. Velocidad de medición efectiva (kPts/seg.)	100	300/600	430	Retorno único: máx. 240.000 pts/s ; Retorno múltiple: máx. 480.000 pts/s
Frecuencia de exploración (Hz)	20-150	5-20	5-30	uno/dos retornos: 80K/s, 160K/s, 240K/s; tres retornos: 80K/s, 240K/s
Campo de visión (FOV) (grados)	-23-+23	-15-+15 (Vertical) 360 (Horizontal)	-17-+3 (Vertical) 360 (Horizontal)	Patrón de barrido no repetitivo: 70,4° (horizontal) × 77,2° (vertical) ; Patrón de barrido repetitivo: 70,4° (horizontal) × 4,5° (vertical)
Max. Altitud de vuelo operativa (AGL) (m)	80	-	-	50m-120m

Resolución angular (grados)	0.001	2 (vertical) 0,1-4 (horizontal/azimut)	0.03-0.2	-
Ecos	Hasta 5 ecos	Hasta 2 ecos	Eco único	-
Peso (kg)	2.4	0.83	0.9	0.930±0.01

En la Tabla 3 se presentan los sensores LIDAR que podrían utilizarse en cualquier dron que cumpla las especificaciones de fabricación, normalmente dictadas por la carga útil, el hardware disponible, el bastidor, el espacio para la instalación y el software. Además, la tabla 3 destaca algunos de los principales parámetros de las soluciones LIDAR, aunque hay más parámetros que deben tenerse en cuenta: potencia, clasificación IP, temperatura de funcionamiento, temperatura de almacenamiento, formatos de archivo de salida, resolución).

5.2 Configuración previa al vuelo

Como se mencionó al principio de esta sección, para ejecutar la misión, los operadores deben seguir ciertos procedimientos para preparar el dron y el equipo relacionado (más detalles en el Módulo 2).

PASO 1 RTK o PPK según la precisión de la configuración del escáner

La configuración del LIDAR en sí sería ligeramente diferente con una configuración específica de Drone-LIDAR. Para obtener un escaneado de alta precisión bien ejecutado, la configuración inicial GNSS (GPS) debe contar con tecnología cinemática en tiempo real (RTK) o cinemática de posprocesamiento (PPK):

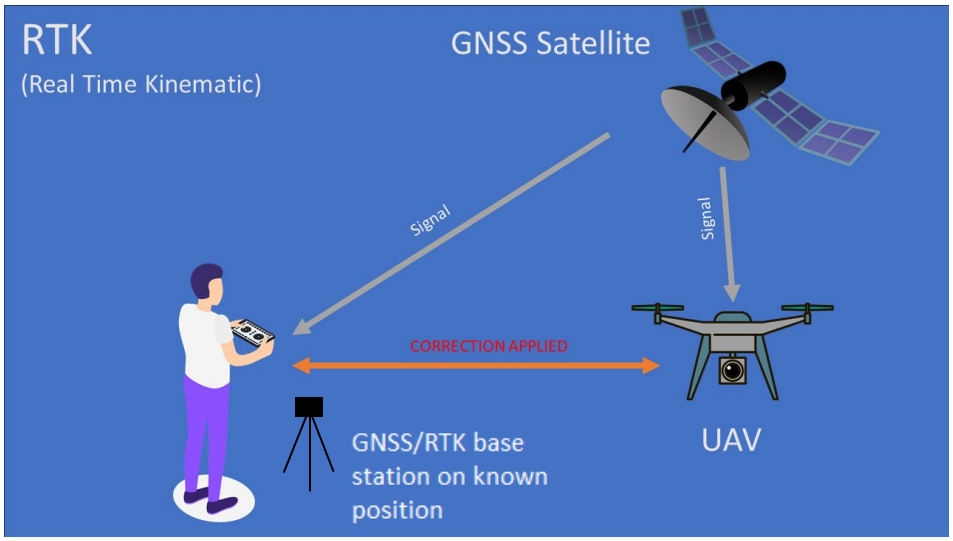


Figura 23 Explicación de RTK

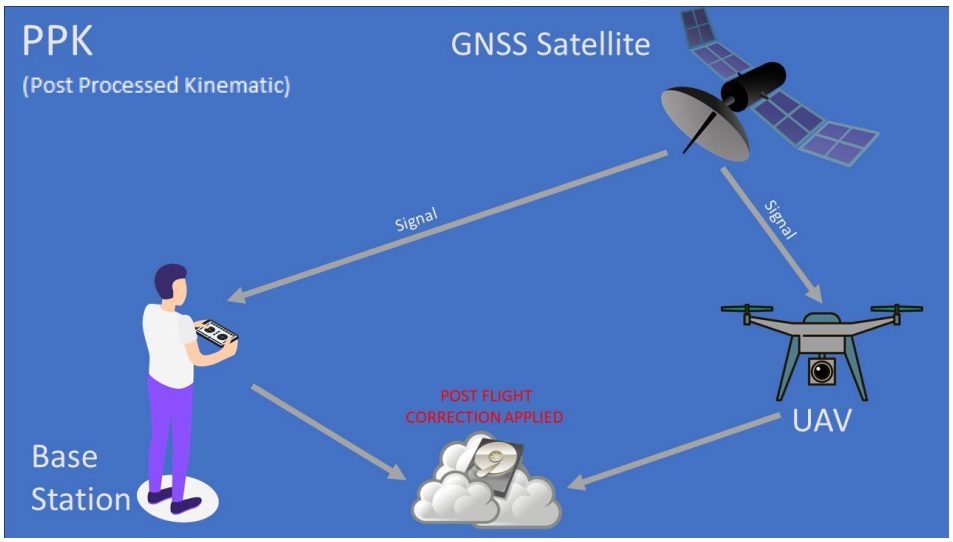


Figura 24 Explicación de PPK

NOTA: Si no se puede garantizar la estabilidad RTK (p. ej., señal de satélite débil), también se debe utilizar PPK.

La principal diferencia entre estos dos enfoques es el tiempo inicial de corrección de la posición:

- La aproximación RTK se corrige durante el vuelo,
- PPK todas las correcciones se producen después del vuelo inicial.

PASO 2 Unidad de Medida Inercial - Calibración IMU

Para garantizar una precisión correcta del LIDAR y de la nube final, los operadores de drones deben calibrar la unidad de medición inercial (IMU). Cada fabricante de drones tiene unos pasos específicos a seguir para completar este paso. Por ejemplo, DJI L1 LIDAR requiere hacerlo antes, durante (cada 100s) y después del vuelo. Estos pasos garantizarán una precisión correcta.

Normalmente, la calibración implica que el UAV ascienda a cierta altitud y luego vuele 30 m hacia delante y la misma distancia hacia atrás.

NOTA: Asegúrese de que la calibración de la IMU se realiza preferiblemente en una zona libre de obstáculos.

PASO 3 Calibración de la cámara RGB

Normalmente, la cámara RBG sólo necesita recalibrarse si hay problemas visuales con los datos capturados. Uno de los ejemplos son las llamadas líneas fantasma en el escaneado de nubes de puntos.

NOTA: Cada fabricante proporcionará instrucciones sobre cómo recalibrar una cámara RGB.

PASO 4 Planificación de la Misión de Vuelo - selección de los parámetros de vuelo correctos y configuración para el tipo que falta.

Dependiendo del tipo de aeronave y del equipo LIDAR, el fabricante aconsejará los parámetros recomendados, entre los que se incluyen:

- FOV - Campo de visión
- Barrido en el suelo: zona de la superficie estudiada en la que se han tomado imágenes.
- Altitud de captura
- Velocidad
- Espaciado de rutas de vuelo

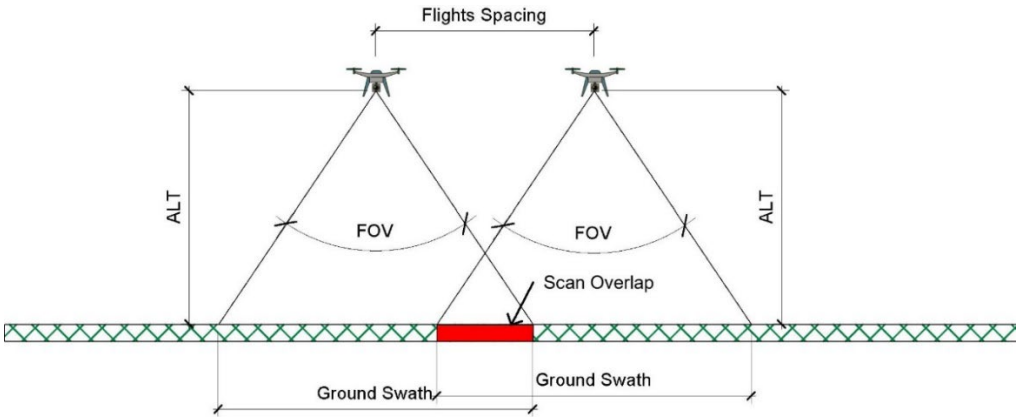


Figura 25 Parámetros de planificación del vuelo

La figura anterior presenta los parámetros de vuelo y su impacto en el solapamiento de la exploración - calidad/densidad de la exploración.

Además, los parámetros a definir antes de una misión incluyen:

- Resolución de escaneado [píxeles]
- Longitud focal [mm]
- Frecuencia de imagen [seg/fotograma]
- Datos necesarios

5.3 Captura en vuelo y software de captura

La captura en vuelo, además de los parámetros de configuración y planificación previa al vuelo, se centrará en el software y sus aplicaciones. La mayoría de las nuevas tecnologías de drones LIDAR tienen aplicaciones preinstaladas que ayudan a planificar el vuelo (no sólo para LIDAR).

Al planificar la captura de datos (como se menciona en el paso 4 de la planificación de la misión), es importante decidir (en función del tipo de estudio, es decir, topografía, riberas, tendido eléctrico) la ruta de vuelo del dron.

Para planificar las rutas, es necesario adquirir/utilizar un mapa detallado y actualizado de la zona (sensible para el fabricante del UAV). Los mapas adquiridos pueden utilizarse en la aplicación de control de drones para la planificación. Es imprescindible comprender el sistema de coordenadas de los archivos cartográficos (a menudo de tipo ***.tiff**).

Figura 26 DJI Terra GUI

Como se ha mencionado anteriormente, el controlador del dron suele tener una aplicación preinstalada que permite planificar la trayectoria.

Figura 27 DJI Pilot App - ejemplo de planificación de misión [12]

La captura se realiza durante el vuelo del dron. Los archivos se guardan en la memoria del dron y, una vez finalizada la misión, pueden transferirse a un ordenador de sobremesa u otro sistema operativo para su procesamiento.

5.4 Procesamiento & Software

A la hora de procesar datos LIDAR de drones hay que tener en cuenta una plataforma. Hay varios paquetes de software disponibles (por ejemplo, DJI terra, PIX4D). Cada software tiene unas instrucciones específicas que hay que seguir.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, los datos deben importarse a un software de posprocesamiento.

Los datos brutos suelen incluir información:

- Datos brutos de puntos LIDAR
- Calibración de la cámara LIDAR
- Calibración de la IMU
- Calibrado visual
- Navegación inercial
- Datos visuales
- Datos de la estación base RTK
- Datos de subantena RTK
- Archivos JPEG - imágenes

Una vez importados correctamente al software de postprocesamiento, los datos están listos para ser utilizados.

Los datos RAW del LIDAR se compilarán en un archivo LAS. Los distintos programas informáticos ofrecerán diversas opciones (por ejemplo, densidad de la nube de puntos y sistema de coordenadas de salida) antes de procesar los datos y generar la nube de puntos.

En términos generales, el postprocesamiento podría definirse en 5 pasos:

A. Procesamiento de la trayectoria - posterior al vuelo - este paso implica la comprobación de posibles errores con la trayectoria
B. Generación de nubes de puntos: como se ha mencionado anteriormente, se genera una nube de puntos a partir de los siguientes parámetros de salida.

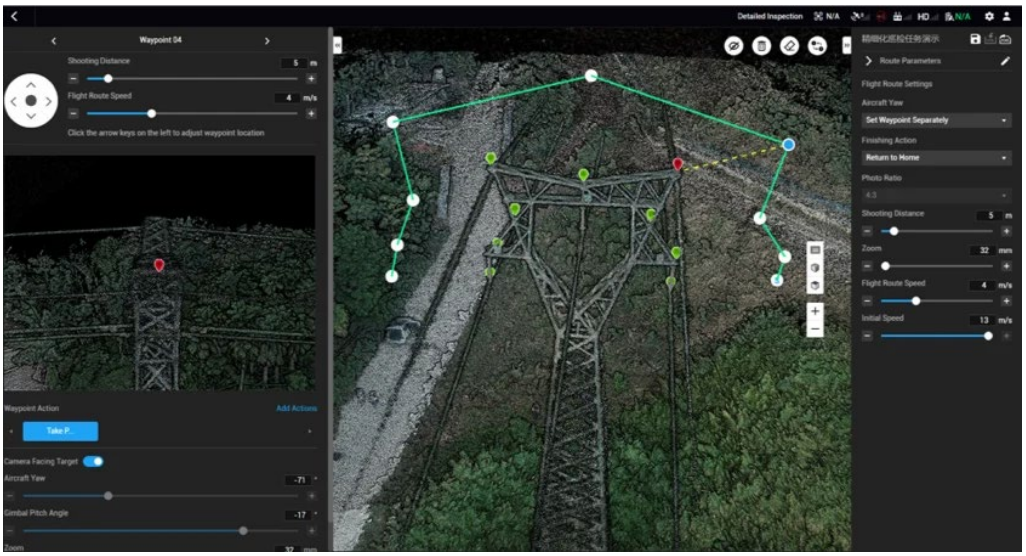


Figura 28 Ejemplo de nube de puntos generada para la inspección de líneas eléctricas.[12]

C. Mejora de la precisión de las nubes de puntos
D. Colorización - este paso consiste en añadir colores a la nube de puntos para obtener una visión más detallada de los objetos/áreas inspeccionados. Este paso consiste en manipular la imagen con RGB alternativo (rojo, verde, azul) para obtener información adicional de la nube de puntos.

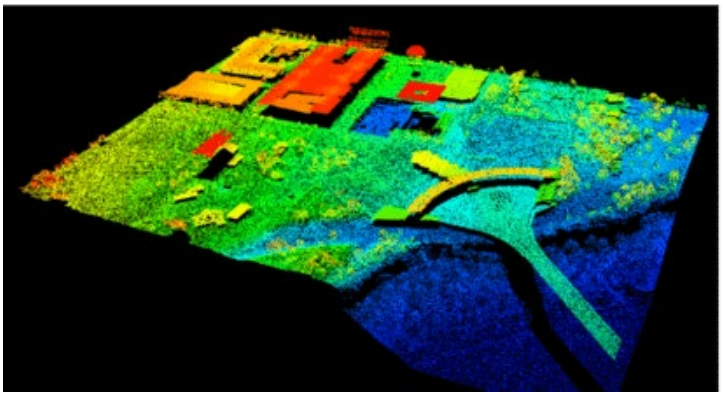


Figura 29 Utilización de la intensidad de color por altura.[13]

E. Clasificación: este paso permite asignar una clasificación a los distintos tipos de elementos/objetos de la nube de puntos. Puede tratarse de diferentes categorías como: suelo, agua, edificio, etc. De este modo, se pueden aislar para mostrar sólo los objetos deseados y mejorar el procesamiento de la nube de puntos.

5.5 Salida de datos

Una de las principales salidas de datos es un archivo de nube de puntos procesado, normalmente un archivo LAS o LAZ, que contiene diferente información (detallada en el capítulo 0). Algunos paquetes de software permiten exportar

- detalles de la misión (datos incluidos en el paquete LIDAR en bruto), - tipo de archivo en función del software
- imágenes capturadas durante la misión (JPEG, PNG, BMP, etc.)
- Mapas 2D (p. ej. Geotiff - imagen georreferenciada;TIFF)
- Modelos 3D (es decir, OBJ,B3DM,OSGB,PLY,S3MB,I2S)

La salida de datos suele estar sugerida por el contrato de la encuesta y el uso final de los datos.

Referencias

1) https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/drones-information-notices
2) https://www.parrot.com/en/drone-regulations/eu
3) Teledetección LiDAR y aplicaciones, Dong y Qi Chen, CRC Press
4) Staiger R., 2003, "Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications", en 2nd FIG Regional Conference, Sheraton Marrakech, Marrakech, Marruecos, 2-5 de diciembre de 2003.
5) https://www.onyxscan-lidar.com/aerial-photogrammetry-and-drone-based-lidar-for-surveying-missions/
6) Análisis de sensibilidad y geometría de medición mínima para la calibración basada en objetivos de escáneres láser terrestres panorámicos de alta gama
7) Vehículos aéreos no tripulados para la gestión de activos. CIRIA
8) Guía del cliente para el escaneado láser 3D y la captura de datos - Grupo de trabajo BIM
9) https://geoslam.com/sample-data/
10) https://enterprise-insights.dji.com/blog/lidar-equipped-uavs
11) Zhou W., Chen F., Guo H., Panpan T. "UAV Laser scanning technology: a potential cost-effective tool for micro-topography detection over wooded areas for archaeological prospection" en International Journal of Digital Earth, enero de 2020.
12) DJI L1 Guía de funcionamiento, V1.1
13) Lohani B., Ghosh S., "Tecnología LiDAR aerotransportada: A Review of Data Collection and Processing Systems" e in Proceedings of the National Academy of Sciences, India - Section A - November 2017.
14) https://www.networkrailmediacentre.co.uk/resources/mzy64-zoghg-6yss8-iq53o-slr0l
15) https://geo3d.hr/sites/default/files/2018-06/Titan-Specsheet-150515-WEB.pdf
16) https://www.yellowscan.com/knowledge/how-does-lidar-work/
17) https://www.dji.com
18) https://www.gim-international.com/case-study/new-generation-zenmuse-l1-lidar-drone-system-combines-quality-with-affordability
19) Luo, Yawen y Chen, Yuhua. (2021). Energy-Aware Dynamic 3D Placement of Multi-Drone Sensing Fleet. Sensors. 21. 2622. 10.3390/s21082622.
20) https://dataspace.copernicus.eu/browser/

Lista de cuadros

Cuadro 1 Comparación de las técnicas TLS y ALS 10
Tabla 2 Tipos de datos y parámetros LIDAR 14
Tabla 3 Imágenes del satélite Sentinel-2 por longitud de onda/banda 22
Tabla 4 Comparación de los detalles de los sensores LIDAR[11] 29

Cuadro de cifras

Figura 1 Escaneado LiDAR (a) Escáner láser terrestre sobre trípode[4] (b) Escaneado láser montado en UAV - escaneado láser aerotransportado[5] 6
Figura 2 Teledetección pasiva y activa 5[3] 7
Figura 3 Componentes clave de un TLS montado sobre trípode (a) Escáner[6] (b) Espejo giratorio dentro del escáner 6[6] 8
Figura 4 Componentes clave de un sistema ELA 6[16] 9
Figura 5 Espectro electromagnético 8[3] 11
Figura 6 Componentes ALS 8[13] 11
Figura 7 Muti Rotar DJI M300 con escáner láser L1 9[17] 12
Figura 8 L1 Escáner láser Zenmuse DJI 9[10] 12
Figura 9 Tipos de datos LiDAR 13
Figura 10 Formatos de datos LiDAR[8] 15
Figura 11 Formato de datos LiDAR LAS (.las)[8] 16
Figura 12 Escaneo LIDAR del puerto[9] 18
Figura 13 Ejemplo de penetración del rayo láser a través de árboles. 19
Figura 14 Ejemplo de exploración forestal[9] 19
Figura 15 Campo de visión[19] 20
Figura 16 Diferentes ejemplos de divergencia del haz LIDAR (no a escala) 21
Figura 17 Ejemplo de imágenes MS LIDAR 24
Figura 18 Ejemplo de escaneado LIDAR del Tower Bridge UK[9] 25
Figura 19 Ejemplo de escaneado LIDAR del río Eden[14] 26
Figura 20 Ejemplo de análisis de líneas de potencia[9] 27
Figura 21 Un ejemplo de equipo LIDAR para drones[10] 28
Figura 22 Explicación de RTK 31
Figura 23 Explicación del PPK 31
Figura 24 Parámetros de planificación de vuelo 33
Figura 25 DJI Terra GUI 34
Figura 26 DJI Pilot App - ejemplo de planificación de misión[12] 35
Figura 27 Ejemplo de nube de puntos generada para la inspección de líneas eléctricas.[12] 37
Figura 28 Utilización de la intensidad de color por altura.[13] 37