



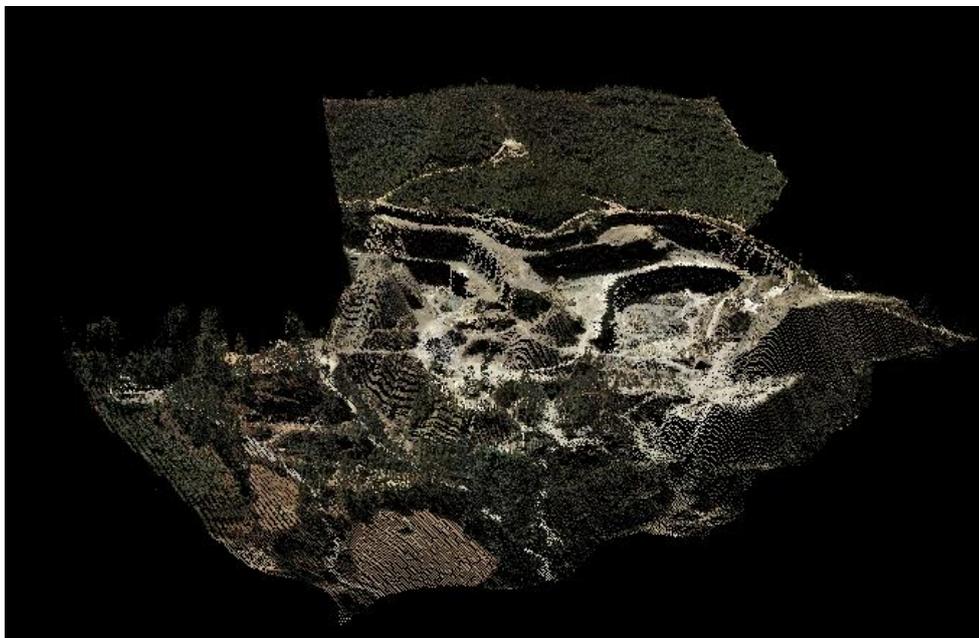
**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

**Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa**



MASTER EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES

TRABAJO FIN DE MASTER



CARTOGRAFÍA DE ACTIVIDADES EXTRACTIVAS A PARTIR DE DATOS LIDAR

Estudiante: Blanca Mosquera Guilcapi

Director: Joan Jorge Sánchez

Convocatória: Enero 2017

RESUMEN

La herramienta tecnológica LiDAR (**L**ight **D**etection and **R**anging) se basa en emplear un rayo de luz para medir distancias y propiedades del medio recorrido a través de las variaciones de la longitud de onda del pulso emitido; ha tomado un auge en los últimos años debido a la gran utilidad que presenta esta tecnología para generar Modelos Digitales de Elevación y, a su vez, desarrollar modelos tridimensionales para poder realizar planificaciones en prevención de riesgos, planificación urbanística, entre otras aplicaciones. LiDAR también resulta una herramienta eficaz para ayudar a la planeación minera, para aquellos proyectos de cierre y de rehabilitación de minas, ya que los datos que proporciona muestran características detalladas de la vegetación, lo cual permite llevar un seguimiento preciso a los programas de recuperación de esos pasivos ambientales.

Por ello, trabajar con datos LiDAR sobre la concesión minera El Padró (Castellbell i el Vilar, Cataluña, España) ha permitido obtener un conjunto de datos en forma de nube de puntos, y a partir del procesamiento de estos datos en el laboratorio se han transformado en un modelo digital mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG). El manejo del SIG permite controlar los parámetros de visualización de la nube de puntos para mejorar el análisis de los mismos, facilitando la caracterización e interpretación de la información obtenida.

En este trabajo se presenta una cartografía basada en la aplicación de datos LiDAR aerotransportado para el control y seguimiento de la concesión minera El Padró, ubicada en la comarca catalana del Bages. El procesamiento de los datos LiDAR mediante el uso de LAStools dentro de QGIS también se presenta, así como el proceso de generación de una visualización de la información mediante las herramientas disponibles. En este punto se ha clasificado la nube de puntos, realizándose una depuración automática de los datos, y se han creado dos productos básicos e imprescindibles: el Modelo Digital de Superficies y el Modelo Digital de Terreno.

Finalmente, y a partir de los archivos *.las* disponibles en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España, a través del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), que proporciona cobertura ortofotogrametría de todo el territorio español, se ha elaborado un diagrama del procesamiento de los datos para permitir su posterior uso en aplicaciones mineras, a la vez que disponer de información valiosa para futuros trabajos de exploración, planeación y operación minera antes de intervenir directamente en el medio, y sin causar afectaciones o impactos ambientales alguno, especialmente en zonas densamente cubiertas de vegetación.

ABSTRACT

Technology tool LiDAR (Light Detection and Ranging), uses a light beam to measure distances and properties of a object, through of the wavelength variation of the emitted pulse, the last years has taken a upswing, due to the great utility of this technology to generate Digital Elevation Models and also to develop three dimensional models, to do planifications on risk preventions, urban planning and other aplications. Also LiDAR is an effective tool, to mining planning, in closing and rehabilitation mining projects, because of data it provides show detailed characteristics of vegetation, which allow to carry out an accurate following of the restoration program of the environmental passive.

Therefore, working with LiDAR data over the mining concession "El Padró" (Castellbell i el Vilar, Catalunya, Spain), has allowed to obtained a set data in form of a point cloud, and after of the data processing, it has been transformed in Digital Elevation Models through a Geographic Information System (GIS). Handling of GIS allow to control the visualization parametres of the point cloud to improve of analysis of them, easing the characterization and interpretation of information obtained.

The cartography presented in this paper, is based on the application of airborne LiDAR data to monitor of the mining concession called " El Padró ", it located on the Bages region. Processing of LiDAR data althrough to use of LAStools on QGIS is presented too. In such as way the point cloud have been classified by the automatic data depuration, and the same time have been created 2 basic and essential products: Digital Surface Model and Digital Terrain Model.

Finally, from *.las* archives available in the National Geographic Institute through of the National Plan for Aerial Orthophotography (PNOA), which provides orthophotogrammetric coverage of the entire Spanish territory, a diagram of the data processing to permit their subsequent use in mining applications has been created, as well as to have valuable information for future exploration, planning and mining operations before to intervening directly in the environment, and without causing any environmental impacts, especially in areas densely covered by vegetation.

INDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
INDICE DE FIGURAS	IV
INDICE DE TABLAS	V
INDICE DE ABREVIATURAS	VI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	1
1.2. LiDAR en aplicaciones económicas y sociales	2
1.3. LiDAR en la Minería	8
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Herramienta LiDAR	11
2.2. Tipos de LiDAR	12
2.3. Dispositivos y funcionamiento	15
2.4. Tipos de datos LiDAR	20
2.5. Disponibilidad de datos	26
2.5.1 Nivel Autonómico	26
2.5.2 Nivel Nacional	27
2.5.3 Nivel Europeo	28
2.5.4 Nivel Internacional	29
2.6. Tipo de software para LiDAR	30
2.7. Herramienta LAStools	31
3. CASO DE ESTUDIO	34
3.1. Metodología y datos	34
3.2. Datos empleados	36
3.3. Procesamiento de datos LiDAR con la herramienta LAStools en QGIS	38
3.4. Presupuesto	57
4. CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: LiDAR en la Agricultura	3
Figura 2 : LiDAR en proyectos urbanos	4
Figura 3: LiDAR en gaseoductos y oleoductos	5
Figura 4: LiDAR en la industria eléctrica	6
Figura 5: LiDAR en inventario forestal	7
Figura 6: LiDAR en arqueología	8
Figura 7: Esquema de la técnica LiDAR	12
Figura 8: LiDAR móvil	13
Figura 9: LiDAR estático	14
Figura 10: LiDAR aerotransportado	14
Figura 11: Esquema de trabajo ALS/LiDAR	15
Figura 12: Esquema de funcionamiento del láser	17
Figura 13: Esquema del Sistema De Navegación Inercial.	18
Figura 14: Esquema de calibración sobre un edificio	19
Figura 15: Retorno de un mismo punto	20
Figura 16: Modelo Digital de Superficie (MDS) y Modelo Digital de Terreno (MDT)	26
Figura 17: Clasificación de vuelos LiDAR por fechas de vuelo según ICGC.	27
Figura 18: Clasificación de vuelos LiDAR según PNOA.	28
Figura 19: Localización concesión minera “El Padró”	34
Figura 20: Datos LiDAR El Padró-PNOA	37
Figura 21: Clasificación de vuelos LiDAR según PNOA	38
Figura 22: Conversión de ficheros PNOA .laz a .las	39
Figura 23: Obtener información del fichero PNOA .las	39
Figura 24: Transformar fichero .las en Shapefile “El Padró”	44
Figura 25: Ortofoto PNOA Municipio Castellbell i El Vilar	45
Figura 26: Corte Ortofoto PNOA con polígono de concesión minera El Padró	45
Figura 27: Ortofoto, Polígono Shp y LiDAR Shp “El Padró”	46
Figura 28: Corte de fichero 1 LiDAR respecto al polígono shp “El Padró”	46
Figura 29: Visualización con <i>lasview</i> de corte fichero 1 LiDAR “El Padró”	47
Figura 30: Visualización con <i>lasview</i> de corte fichero 2 LiDAR “El Padró”	47
Figura 31: <i>Lasmerge</i> unión de fichero 1 y 2 para obtener LiDAR_ELPADRÓ	48
Figura 32: Visualización con <i>lasview</i> de fichero LiDAR_ELPADRÓ	48
Figura 33: Fichero LiDAR_ELPADRÓ en formato shp, visualización en QGIS	49
Figura 34: Representación fichero LiDAR_ELPADRO en fugroviewer	51
Figura 35: Diagrama de flujo clasificación de nube de puntos LiDAR_ELPADRO.	52
Figura 36: Clasificación Nube de Puntos LiDAR_ELPADRO con <i>lasground</i>	53
Figura 37: Clasificación nube de puntos LiDAR_ELPADROg con <i>lasheight</i>	53
Figura 38: Clasificación nube de puntos LiDAR_ELPADROgh con <i>lasclassify</i>	54
Figura 39: Diagrama de flujo obtención de MDS y MDT concesión minera “ELPADRÓ”	55
Figura 40: Algoritmo <i>las2dem</i> para genera MDS_LiDAR_ELPADRO	55
Figura 41: Algoritmo <i>las2dem</i> para generar MDT_LiDAR_ELPADRO	56
Figura 42: Esquema de elementos plataformas UAS	57

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Versiones del formato <i>.las</i>	21
Tabla 2: Campos contemplados en el PDRF 3.....	22
Tabla 3: Información contenida en la cabecera de un fichero <i>.las</i>	24
Tabla 4: Clasificación de la nube de puntos según ASPRS	24
Tabla 6: Características datos LiDAR ICGC	27
Tabla 7: Características de datos LiDAR a nivel nacional (IGN)	28
Tabla 8: Portales con información LiDAR a nivel Europeo	29
Tabla 9: Portales con información LiDAR a nivel internacional	29
Tabla 5: Algoritmos destacados de la herramienta LAsTools	33
Tabla 10: Datos de superficie concesión minera “El Padró”	34
Tabla 11: Hitos de concesión minera “El Padró”.....	35
Tabla 12: Características de datos LiDAR a nivel Nacional (IGN)	37
Tabla 13: Información de la cabecera del fichero 1 PNOA <i>.las</i> concesión minera “El Padró”	41
Tabla 14: Información de la cabecera del fichero 2 PNOA <i>.las</i> concesión minera “El Padró”	43
Tabla 15: Información de la cabecera del LiDAR_ELPADRÓ <i>.laz</i>	51

INDICE DE ABREVIATURAS

ALS	Escáner Láser Aerotransportado
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IMU	Unidad de Medición Inercial
INS	Sistema Inercial de Navegación
LAS	Log ASCII Standard
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevación
MDS	Modelo Digital de Superficie
MDT	Modelo Digital de Terreno
PDRF	Point Data Record Format
PNOA	Programa Nacional de Ortofotografía Aérea
QGIS	Quantum GIS
SHP	Shapefile
SIG	Sistema de Información Geográfica
UAS	Sistema de Aeronaves no Tripuladas

1. INTRODUCCIÓN

El uso de datos provenientes de sensores Escáner Láser Aerotransportados (*ALS* siglas en inglés), o LiDAR (acrónimo de *Light Detection and Ranging*) ha tomado un auge durante los últimos años. Esto debido a la gran utilidad que presenta esta herramienta tecnológica para la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) de alta resolución y la gran utilidad de estos modelos en varios ámbitos de aplicación, como la generación de modelos tridimensionales urbanos, hasta la planificación y prevención de riesgos en caso de un desastre natural (Fernández & Siabato, 2011).

El planeamiento inicial de este trabajo se centra en crear cartografía de alta resolución de actividades extractivas para el caso de estudio: concesión minera “El Padró”, utilizando los datos LiDAR de libre acceso disponibles en los web del Gobierno Español, por medio del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y a través del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), para lo cual se ve la necesidad de procesar datos LiDAR con el software QGIS (Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto).

El tratamiento de datos LiDAR con este software suscita un problema al momento de querer visualizarlos, ya que QGIS es incapaz de mostrar la información de los archivos *.las*, información que es importante para la elaboración de productos derivados de los datos LiDAR, para ello hace uso de la herramienta LAsTools incorporada en QGIS para poder manejar toda la información y realizar cartografía de alta calidad.

1.1. Objetivos

- Identificar la utilidad de la tecnología LiDAR ALS aerotransportada en la actividad minera, caso de estudio concesión minera El Padró.
- Obtener MDT y MDS de la concesión minera El Padró, a partir de la nube de puntos LiDAR obtenida del PNOA.
- Crear una visualización 3D a partir del MDT y MDS de los datos LiDAR de la concesión minera El Padró.
- Crear mapa de pendientes para conocer gradientes de la concesión minera El Padró.

1.2. LiDAR en aplicaciones económicas y sociales

Según el artículo de Lefsky et al. (2002), en la revista BioScience, LiDAR es una tecnología de teledetección que mide directamente la distribución en 3D del dosel de las plantas, así como la topografía subdosel, lo que proporciona mapas topográficos de alta resolución y estimación muy precisa de la altura de la vegetación, la cubierta, y la estructura de la cubierta, causando un interés en particular para profesionales en áreas como forestal, paisajística y ecologistas mundiales (Lefsky, Cohen, Parker, & Harding.D., 2002).

También señala que este tipo de sensores tienen otras aplicaciones como el mapeo de la cobertura terrestre en grandes categorías, al igual que la estimación de la biomasa y el índice de área foliar por encima del suelo.

Las mediciones hechas por LiDAR hacen posible que el mundo científico, profesional de diferentes disciplinas, entre ellas la cartografía, puedan examinar los entornos naturales y artificiales con precisión, exactitud y flexibilidad (National Ocean Service, 2015), además de ser empleados también para estudios atmosféricos y diversas aplicaciones como la obtención de superficies del terreno, de la vegetación, de los edificios, etc.

Debido a que es una tecnología amigable con el ambiente, la tecnología LiDAR ha sido aplicada en diferentes campos de la ingeniería y en temas relacionados con el ambiente. A continuación, se hablará de diversas áreas en donde han tenido aplicaciones importantes.

a) LiDAR en la Industria Agropecuaria.

Los usos del LiDAR en la Agricultura han sido diversos (figura 1), entre los más interesantes destacan la evaluación de los parámetros vegetativos en cultivos arbóreos y herbáceos, la obtención de Modelos Digitales de Elevación con vegetación y árboles en 3D, la estimación de la superficie foliar en frutas y viña, así también como poder estudiar el potencial del sistema de riego para la mejora de la producción del cultivo, además del estudio de posibles áreas de riegos de inundación (Días, 2014).

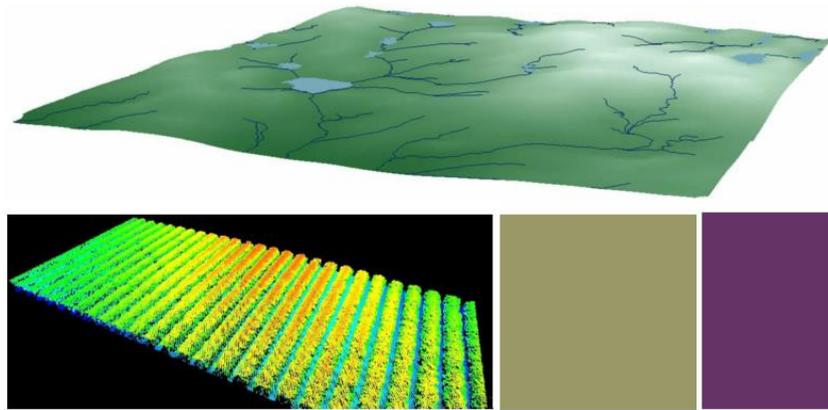


Figura 1: LiDAR en la Agricultura (Días, 2014).

b) LiDAR en Proyectos Urbanos.

Con el uso de esta tecnología efectuando un solo vuelo LiDAR sobre entornos urbanos, se puede procesar los datos obtenidos para detectar la altura de edificios, las construcciones marginales, usos de suelo, planeación de construcciones de acuerdo al relleno de terreno, detectar la vegetación y crear Modelos Digitales de Superficie (MDS) mostrando las construcciones o separando la infraestructura del terreno Modelos Digitales de Terreno (MDT) o terreno desnudo. Lo que facilita una información veraz y completa para estudios de planificación territorial de cualquier urbe (Días, 2014).

Dentro de esta aplicación su utilización es múltiple, empezando por aplicar el LiDAR para estudios de inundaciones que ha permitido obtener una predicción más precisa de inundaciones, esto gracias a una captura de datos del área a estudiar en alta resolución, obteniendo una mejor planeación para evitar las inundaciones a posibles área potencialmente afectas (figura 2).

De igual manera LiDAR ha permitido planear de forma precisa y eficaz las nuevas ciudades o modificaciones en las áreas urbanas, haciendo esta herramienta fundamental para el desarrollo y crecimiento urbano planificado.

Y si es que al LiDAR intercalamos una ortofotografía (ortoimagen), permitirá la modernización catastral para mejorar el funcionamiento de los catastros municipales y generar así la oportunidad de su aplicación en el desempeño de las diferentes áreas y acciones planificadas por los gobiernos, y demás actividades que el sector público se

plantea, lo que permitirá una mejor recaudación de impuestos relativos a propiedades inmobiliarias.

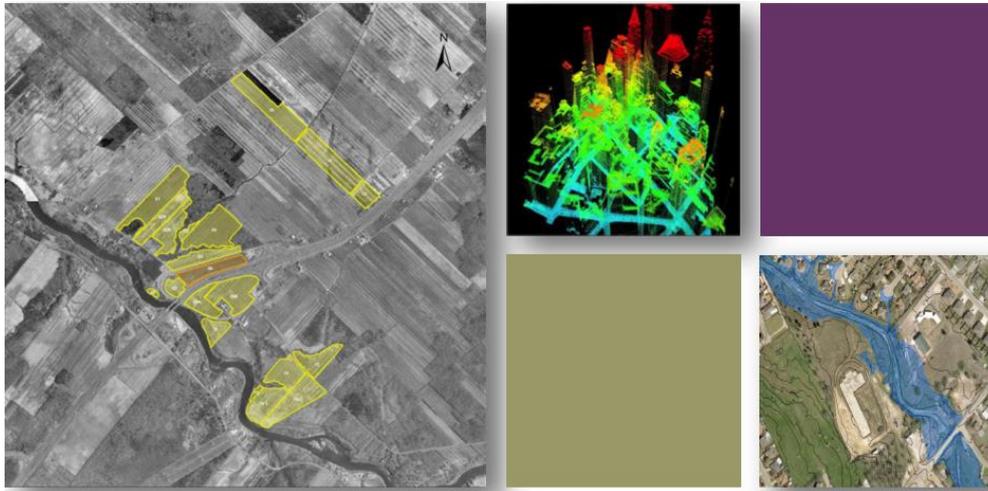


Figura 2 : LiDAR en proyectos urbanos (Días, 2014).

c) LiDAR en Gaseoductos y Oleoductos

Las tuberías y corredores de ductos son aspectos de suma importancia y llegan a ser puntos críticos en las infraestructuras, que presentan muchos desafíos administrativos, como son, seguridad industrial, seguridad operacional, protección, confiabilidad, planificación a futuro y gestión de activos. Tanto los datos específicos relacionados directamente con los ductos como la información sobre las características de sus alrededores son de alta importancia. La altura de las edificaciones, su volumen y ocupación, el uso del terreno adyacente, la sensibilidad medioambiental y la evaluación de peligros, son todos aspectos claves para la operación de corredores de tuberías (Días, 2014).

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE), los datos LiDAR clasificados y las ortofotografías digitales son herramientas de gran valor para la evaluación técnica de los proyectos de construcción de ductos, que incluyen entre otros, los estudios geomorfológicos y las evaluaciones de impacto ambiental.

El uso de los Modelos Digitales de Terreno (MDT), que representan la verdadera superficie de la tierra debajo de la espesa vegetación, ayuda a los ingenieros a identificar las inestabilidades del suelo y determinar otras características que pueden

impedir que el desarrollo de un oleoducto sea seguro, económico y de bajo impacto ambiental (Días, 2014).

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) generados a partir de los datos LiDAR, con la adecuada clasificación de varios elementos del corredor propuesto, y con ortofotografías rectificadas y la delineación del vector, son vistos como un conjunto de información precisa y comprensiva para evaluar los diferentes aspectos de ingeniería en los proyectos de planeación de rutas (figura 3).



Figura 3: LiDAR en gaseoductos y oleoductos (Días, 2014).

d) LiDAR en la Industria Eléctrica.

Ya que en la actualidad la población mundial tiene un crecimiento exponencial evidentemente acelerado, lo que ocasiona que cada vez más espacios naturales sean ocupados como viviendas, quitando así área verde a nuestro planeta, de igual manera surge la necesidad de proporcionar a la población de servicios básicos de vivienda entre ellos el abastecer a los habitantes de electricidad sin importar los lugares más recónditos donde se encuentre una vivienda; esto no deja de ser, que a la sociedad se le tenga que dotar de una red eléctrica confiable y segura, para ello es necesario planear nuevas líneas de transmisión eléctrica.

Para el diseño de nuevas líneas de transmisión eléctrica se necesita información detallada del terreno y de todos los elementos, estructuras y condiciones del corredor propuesto, con el objetivo de seleccionar la mejor ruta. La combinación de LiDAR con imágenes digitales proporciona un conjunto de datos que ayuda a minimizar el tiempo para el diseño preliminar, maximiza el trazado de las líneas y a definir un presupuesto de construcción preciso.

La combinación de LiDAR con la ortofotografía digital es una herramienta vital para detectar problemas, como pueden ser torres oxidadas, postes de madera con inclinación excesiva, o incluso cables caídos (figura 4). Normalmente las áreas de riesgo son de difícil acceso con métodos tradicionales, haciendo que los chequeos regulares de las líneas sean difíciles de efectuar, por lo que esta tecnología permite a los técnicos revisar líneas con mayor facilidad y eficiencia desde sus oficinas, sin tener que enfrentarse a accidentes o riesgos por la inspección de dichos aspectos (Días, 2014).

Como se mencionó anteriormente, la demanda de energía está creciendo aceleradamente. Esta demanda se satisface con el incremento en la capacidad de las redes de transmisión eléctrica, lo que generalmente se puede obtener a través de mejoras en las líneas existentes, ya sea aumentando permanentemente la capacidad de transmisión o alterando temporalmente la capacidad de ciertas líneas para compensar mientras otras líneas se encuentran en mantenimiento.

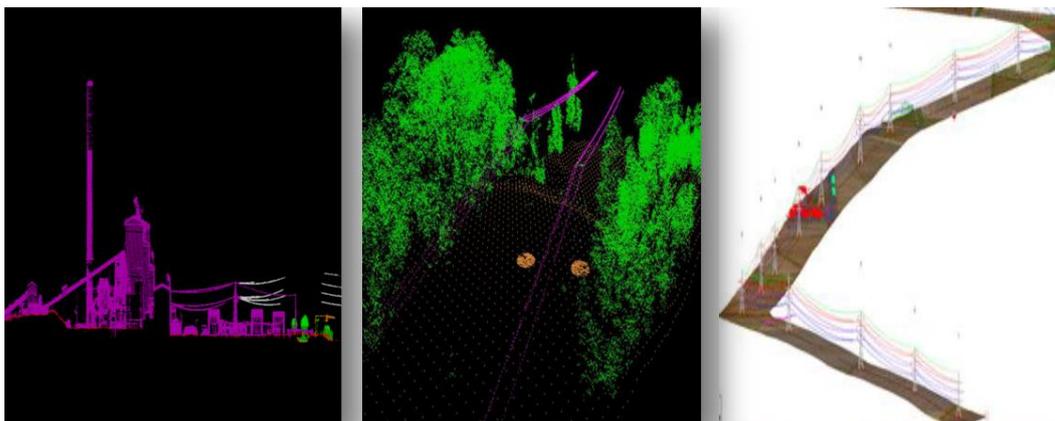


Figura 4: LiDAR en la industria eléctrica (Días, 2014).

e) LiDAR en Inventario Forestal

La tecnología LiDAR es de gran utilidad en el sector forestal, gracias a la ventaja de poder medir la cota del terreno y la cota de la parte más alta de la vegetación de forma simultánea, lo que permite obtener directamente la altura de la vegetación, incluso en zonas de vegetación densa (figura 5), donde con el uso de sensores ópticos no es posible tener una visión directa del terreno, pues con LiDAR se logra tener una visión de la vegetación en 3 dimensiones.

La tecnología LiDAR y sus aplicaciones en el ámbito forestal está siendo una revolución al igual que en su día fue la aparición de las ortofotos. Cuando se combina cartografía ya existente, un MDT de mayor precisión, la estructura del bosque en tres dimensiones y herramientas GIS, se convierte en una herramienta potente de análisis de las estructuras forestales, y por tanto la interpretación de múltiples parámetros silvícolas de manera automatizada (Killinger, 2014)

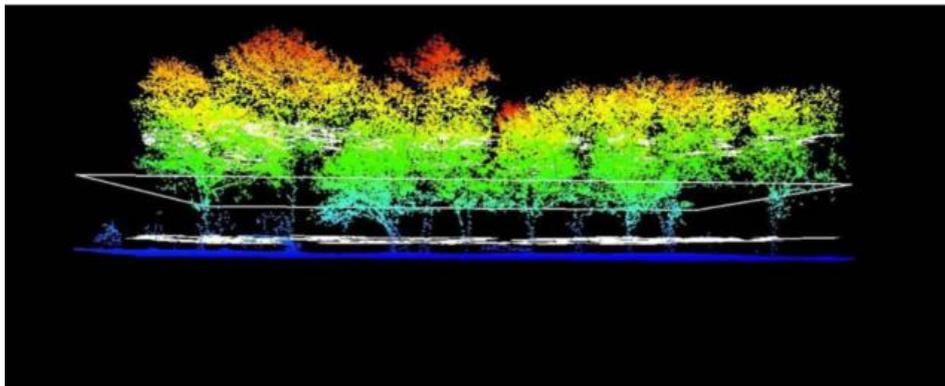


Figura 5: LiDAR en inventario forestal (Días, 2014).

f) LiDAR en la Arqueología.

Gracias al sistema LiDAR, a diferencia de la fotografía aérea tradicional, se pueden visualizar restos arqueológicos bajo las cubiertas de vegetación o zonas intensamente cultivadas, aplicación que será de gran ayuda a los arqueólogos, ya que hasta ahora, una técnica muy usada en arqueología es la fotogrametría, pero los resultados no son tan buenos y requiere un proceso más lento, porque necesita realizar muchas rectificaciones para obtener una imagen de calidad. Ahora con la tecnología LiDAR se obtiene una nube de puntos 3D del escenario en el que se localiza de forma más rápida y precisa cualquier elemento cultural (figura 6).

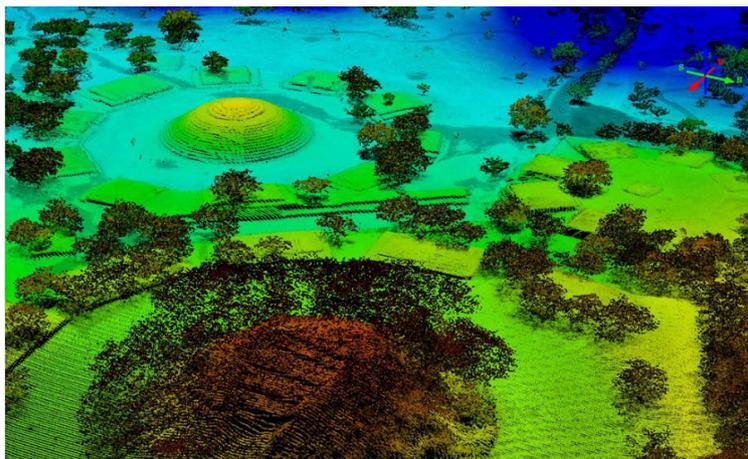


Figura 6: LiDAR en arqueología (Maxwell, 2014).

Uno de los últimos descubrimientos realizados por los investigadores de la Universidad de Salamanca quienes han sido pioneros en la utilización del LiDAR, para cartografiar el terreno desde un avión para un trabajo arqueológico en España, obteniendo como resultado identificar nueva zonas en la que los romanos realizaban trabajos mineros en busca de oro en la zona del valle del río Era, provincia de León (DiCYT, 2014).

1.3. LiDAR en la Minería

Tradicionalmente, los proyectos en la industria Minera se han venido realizando incluyendo técnicas convencionales como la aerofotogrametría, probando que ésta genera altos costos y requiere mucho tiempo para obtener la topografía con la precisión y exactitud exigida por los profesionales en el campo de la minería. En este sentido, con el fin de satisfacer las necesidades profesionales que enfrenta la industria minera, los levantamientos topográficos realizados con LiDAR, apoyado con las imágenes digitales, apoyan eficazmente los estudios para los proyectos en la industrial minera, facilitando la obtención de información de primera mano que no se ha podido conseguir con los métodos de la fotografía tradicional.

La tecnología LiDAR combinada con ortofotogrametría se transforma en una herramienta eficaz para ayudar a la planeación minera. Mediante el uso de datos LiDAR para los modelos digitales de elevación, se puede evaluar los riesgos geotécnicos de las vías, escombreras, relaves, bancos y bermas.

Para aquellos proyectos de cierre y la rehabilitación de minas, los datos LiDAR proporcionan características detalladas de la vegetación, lo cual permite dar un seguimiento preciso a los programas de recuperación de esos pasivos ambientales.

El sistema LiDAR ayuda a que las inversiones en la industria minera tengan éxito, ya que proporciona información altamente precisa y oportuna sobre lo que se encuentra en el suelo, siendo dicha información muy útil para las diferentes etapas de la industria minera como se comenta a continuación.

a) LiDAR en la Exploración Minera

Los levantamientos topográficos LiDAR y las imágenes digitales cada día más suelen apoyar los estudios de exploración minera. LiDAR es capaz de cubrir grandes áreas para evaluar la geomorfología regional y así apoyar las tareas de exploración.

La capacidad que tiene LiDAR de penetrar en la vegetación permite que se generen Modelos Digitales de Terreno (MDT), los cuales se utilizan para identificar las características superficiales de las zonas geológicas que no son visibles con métodos tradicionales.

Los datos topográficos obtenidos por los estudios con LiDAR ayudan a orientar las operaciones de campo, haciéndolas más eficientes y disminuyendo los impactos ambientales (LiDAR México, 2012).

b) LiDAR en la Planeación Minera

Las nuevas explotaciones mineras, al igual que los proyectos de expansión, necesitan información topográfica a tiempo y detallada para calcular costos y planear con exactitud la fase de ingeniería y construcción de la mina; ello se logra con los datos LiDAR junto a la ortofotografía, ya que conjuntamente son una herramienta eficaz para ayudar a la planificación minera.

c) LiDAR en la Infraestructura Minera.

Si se va a requerir una nueva infraestructura, los datos LiDAR son la base para generar modelos PLS-CADD (Power Line Systems - Computer Aided Design and Drafting), programa más poderoso en el mercado para el diseño de líneas de transmisión aérea; en este caso ayuda a proveer de electricidad a las operaciones mineras. Además de los modelos PLS-CADD, los datos LiDAR junto a los servicios de SIG (Sistema de Información Geográfica) adquiridos con LiDAR y Ortofotos, puede ayudar a diseñar o mejorar carreteras de acceso en las áreas mineras (LiDAR México, 2012).

d) LiDAR en Mina en Operación

Realizar un levantamiento topográfico con LiDAR sobre minas en operación presenta retos significativos que se deben superar de forma segura.

Los vuelos para la recolección de datos tienen que ser cuidadosamente coordinados con los operadores de la mina para minimizar el impacto sobre las operaciones mineras diarias, tales como voladuras y perforaciones.

Los datos LiDAR sirven como apoyo para monitorear efectivamente las operaciones mineras. Mediante el uso de datos LiDAR para los modelos digitales de elevación, se puede evaluar los riesgos geotécnicos de las vías, escombreras, relaves, bancos y bermas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Herramienta LiDAR

El término LiDAR quiere decir, detección y posicionamiento (alcance) mediante luz, y su desarrollo tecnológico nace en los años 70 del siglo pasado, en los laboratorios de la NASA, aunque aplicaciones de esta tecnología no se encontraron hasta que se desarrollaron los sistemas de posicionamiento y navegación y, fue entonces cuando LiDAR se implantó como una herramienta alternativa más en la cartografía.

Concretamente en el año 1988 LiDAR se presenta como herramienta alternativa en la cartografía de la mano del profesor Ackerman del Instituto de Stuttgart, que la utiliza en sus actividades de investigación en Fotogrametría. Su desarrollo fue lento, en 1996 se conoce que una sola compañía la comercializaba (Optech), pero actualmente sus aplicaciones han hecho que más de 40 compañías oferten trabajos con dicho sistema (Rodríguez, 2009), y se haya convertido en una técnica alternativa a las técnicas topográficas y fotogramétricas para la generación de MDE de gran densidad y precisión.

LiDAR es un método de detección remota que utiliza la luz para medir distancias variables a la Tierra. Esta luz es en forma de un láser pulsado, y estos impulsos pueden ser utilizados para producir datos exactos acerca de las características de la superficie de la Tierra (Maxwell, 2014).

Según el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, se define la tecnología LiDAR como un sistema telemático activo de captura de datos. Una de sus grandes ventajas al calcular directamente el Modelo Digital del Terreno se basa en que no es necesario interpolarlo a partir de la cartografía tradicional, lo que hace que mejore la precisión de los estudios en zonas cubiertas de vegetación y ahorro de tiempo (Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio., 2015).

El sensor LiDAR, tal como muestra la figura 7, es un sensor activo que emite pulsos de luz láser en las bandas del infrarrojo y/o del ultravioleta del espectro electromagnético, lo cual le permite capturar la señal reflejada por la superficie topográfica barrida; la medida del tiempo empleado por cada señal emitida en recorrer el espacio comprendida entre el transmisor y la superficie física del terreno es el principio de su utilidad.

De esta forma, mide la luz reflejada por objetos lejanos y determina distancias a partir del tiempo que tarda cada pulso emitido por el sensor en llegar a la superficie y volver, similar al principio de la tecnología radar; en lo que es distinto es en la longitud de onda de la señal utilizada. Así, si se quiere determinar la tripleta de coordenadas de cada punto (X, Y, Z), se requiere de técnicas de posicionamiento global (GPS) en modo diferencial en tiempo real y sistemas de navegación inercial (IMU) que permitan caracterizar identificar la posición espacial del instrumento de medición (García Gutiérrez, 2008).

El Láser Escáner Aerotransportado (ALS)/ LiDAR consiste en un sensor láser incorporado en una plataforma móvil (helicóptero o avión), que barre el área de trabajo o estudio. Una de sus características principales es el alto número de puntos que registra con una gran homogeneidad espacial, aunque, por otro lado, presenta una dificultad a la hora de identificar el cuerpo sobre el que impacta.

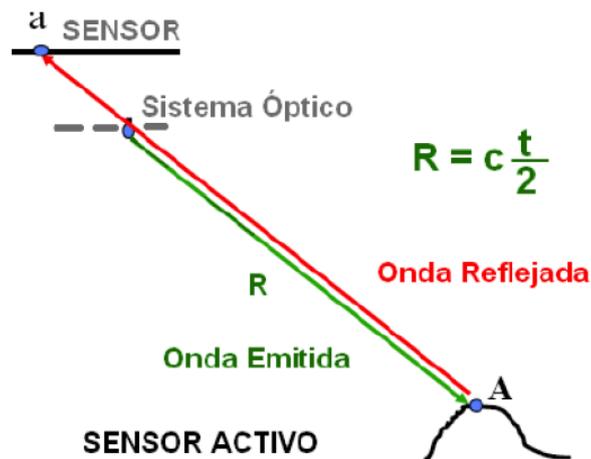


Figura 7: Esquema de la técnica LiDAR (IGN, 2014).

2.2. Tipos de LiDAR

Se pueden clasificar en 2 subconjuntos los tipos de LiDAR.

a) Por tipo de medida

- LiDAR Dispersómetro, rayo láser dispersado, reflejado o re-emitido que proporciona información del coeficiente de extinción (relacionado con la absorción de la luz) de la capa atmosférica.

- LiDAR de Absorción Diferencial (DIAL): analiza el retorno de un láser a diferentes longitudes de onda, para determinar la densidad de un componente atmosférico, perfil atmosférico del vapor de agua y de la temperatura.
- LiDAR Doppler: para determinar la velocidad del viento, mide el desfase Doppler de la luz dispersada por los aerosoles transportados por el viento.
- Altimetro LiDAR: medidas precisas de distancia (en función del tiempo de retorno) entre altura de referencia y posiciones concretas de la superficie.

b) Por posición del sensor

- **Terrestre (Laser Scanning):** se distinguen dos tipos de LiDAR terrestre, móvil y estático. El LiDAR terrestre se encarga de recopilar puntos muy densos y exactos, con lo cual permite la identificación precisa de los objetos. La información proporcionada por la nube de puntos se puede utilizar para administrar instalaciones, realizar relevamientos topográficos de carreteras y vías férreas, e incluso crear modelos de ciudades en 3D.
 - **Móvil:** Para este caso, el sistema se monta en un vehículo en movimiento, trenes e incluso barcos (figura 8). Normalmente para obtener la nube de puntos se necesita que el sensor esté acompañado de cámaras, GPS y un INS, al igual que como ocurre en los sistemas aerotransportados.

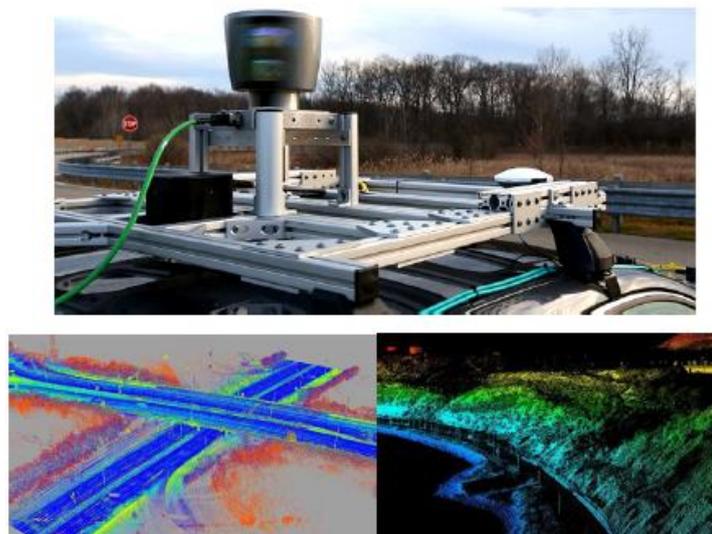


Figura 8: LiDAR móvil (IGN, 2014).

- **Estático:** como el mismo nombre indica la nube de puntos LiDAR se registra desde una ubicación estática. El sensor se monta en un trípode (figura 9) y es portátil, y suele acompañarse de un sistema de captura de imágenes, siendo una de las aplicaciones más típicas la recopilación de datos dentro y fuera de edificios.

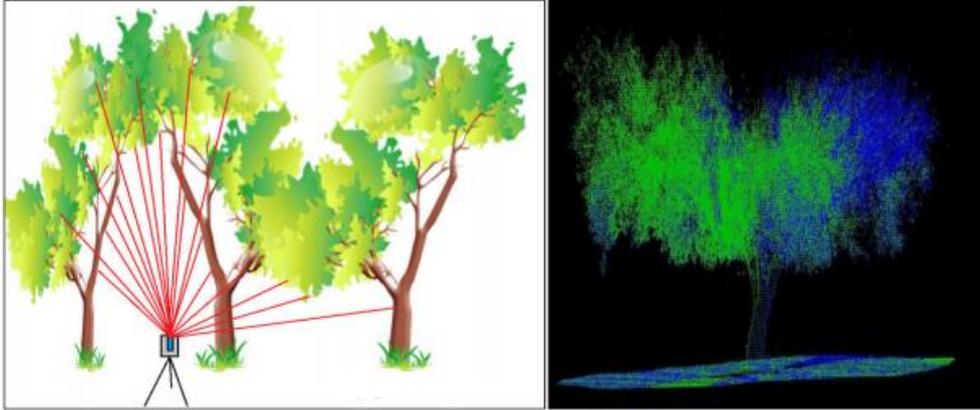


Figura 9: LiDAR estático (Gajardo, 2012).

- **Aerotransportado:** El sistema de LiDAR Aerotransportado se instala en un avión o en un helicóptero (figura 10); su principio de funcionamiento empieza cuando el sensor emite la luz de láser infrarrojo hacia el suelo y es devuelta al sensor aerotransportado en movimiento. Este tipo de sensores se utiliza preferentemente para zonas de difícil acceso o con gran densidad de vegetación.

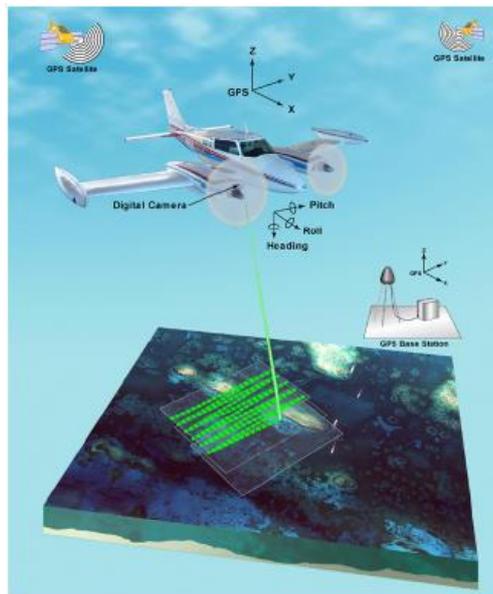


Figura 10: LiDAR aerotransportado (IGN, 2014).

2.3. Dispositivos y funcionamiento

Una vez descritos los tipos de LiDAR, cabe decir que este trabajo se centra en el LiDAR Aerotransportado, para el cual se describen los componentes y el funcionamiento para obtener una nube de puntos.

Esencialmente el sistema láser escáner aerotransportado (ALS) LiDAR es un método directo y activo de captura de datos, cuyo principio es un sensor láser instalado en una plataforma móvil que barre las superficies que se encuentran entre el sensor y el terreno obteniendo una nube de puntos de coordenadas precisas (Martínez, 2008).

Normalmente el equipo se compone por un sensor láser, un sistema inercial de navegación (INS), y un receptor GPS en una plataforma. Debe existir una red GPS en tierra para trabajar de forma conjunta con el receptor GPS de la plataforma con un número mínimo de satélites GPS (cuatro) para el levantamiento, como se indica en la figura 11, para poder triangular y determinar las coordenadas de la antena GPS del medio de transporte aéreo segundo a segundo.

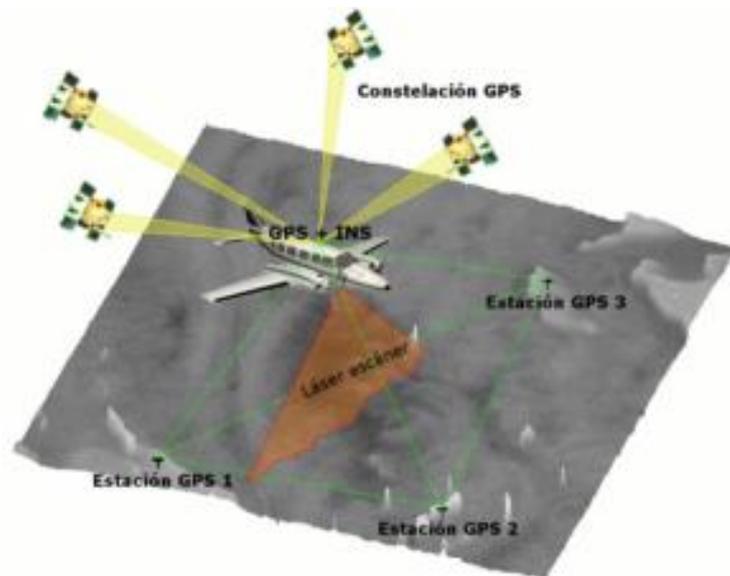


Figura 11: Esquema de trabajo ALS/LiDAR (Martínez, 2008).

Para mejor detalle se describe brevemente cada uno de los equipos utilizados para la generación de nubes de puntos.

➤ Sensor láser

El sensor láser mide las distancias de la plataforma al terreno, es decir, mide la potencia de retorno de la señal de modo continuo. Es un sensor de barrido que viene acompañado de un espejo rotatorio, éste hace que los rayos láser se dirijan a ambos lados del avión, teniendo como variable el ángulo de apertura especificado, con lo cual se obtiene un barrido de una franja de terreno a medida que avanza el medio de transporte aéreo, que será mayor o menor dependiendo de la altura del vuelo.

Si el área de estudio es extensa es necesario establecer líneas de vuelos paralelas guiadas con GPS, con esto se podrá asegurar la cobertura total de la zona a estudiar, utilizando corredores estrechos, que a su vez se asegura que no queden áreas sin datos (Martínez Blanco, 2016).

Se puede establecer una clasificación dentro de los sensores LiDAR en función del tamaño del pulso en el suelo. Por ellos se habla de LiDAR de huella pequeña si el tamaño del pulso en suelo está entre los 20 y 40 cm, y de huella grande aquellos dispositivos con huellas del orden de las decenas de metros (García Gutiérrez, 2011).

Las configuraciones del sensor son múltiples, empezando por el modo de trabajo del láser empleado, siendo éste de pulso o de onda continua. La trayectoria que describe sobre el terreno la señal reflejada por la óptica de salida del sensor láser, es otro parámetro que define el funcionamiento del sensor.

Existen otros parámetros importantes del sensor, como son la frecuencia de escaneado (f), la divergencia del láser ($IFOV$), y el semiángulo de apertura (β), siendo este parámetro importante para la captura de datos. Los sistemas disponibles llegan a ofrecer ángulos hasta 45° , afectando directamente a la posición vertical de los puntos obtenidos, por lo que se recomienda se limiten a 30° no superando los 15° .

Según la configuración del láser, se pueden registrar distintos retornos, como el caso de algunos que registran solo el primer y el último retorno, otros solo el último, etc. Todo esto depende del cuerpo sobre el cual el haz de láser haya sido reflejado hacia el sensor; para asegurar este retorno al emisor del haz enviado es necesario que la reflexión del cuerpo impactado sea de tipo lambertiana (es la superficie ideal, que refleja el haz incidente de manera uniforme en todas las

direcciones), como para el caso del agua no pase puesto que el haz de luz penetra en el agua y puede ser reflejado al emisor del haz (Martínez, 2008).

De acuerdo a la figura 12 se puede identificar en la gráfica de la izquierda la emisión de los pulsos y la recepción del caso de la derecha. Visualizando claramente la diferencia entre los retornos de un elemento sólido como el pavimento (R1-5) o el edificio (R1-1) y la vegetación no muy densa (R1-2, R1-3 y R1-4).

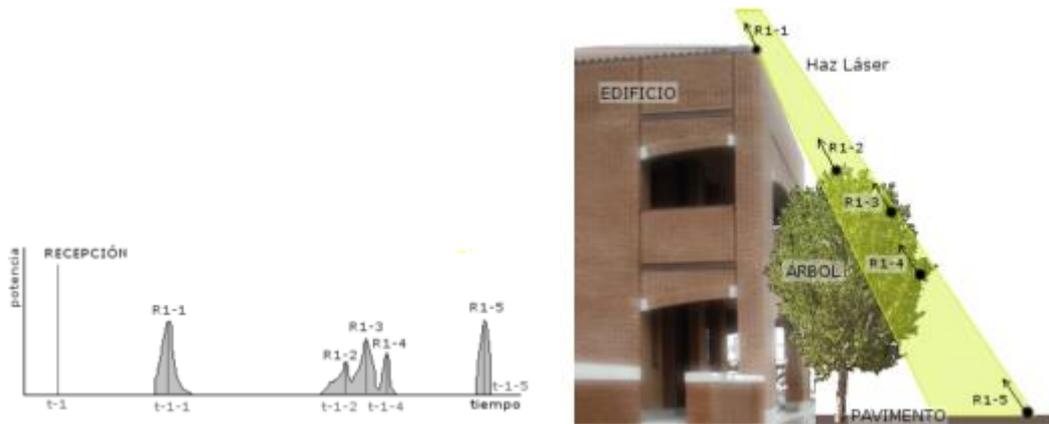


Figura 12: Esquema de funcionamiento del láser (Martínez, 2008).

➤ Sistema de Navegación Inercial (INS)

La unidad que realiza la función de navegación inercial es la Unidad IMU. El INS orienta la plataforma tomando como punto fijo la posición de la antena GPS, siendo habitual el uso de sistemas cartesianos de coordenadas X, Y, Z.

El INS dispone la actitud del instrumento indicando los ángulos de orientación, para lo cual se determinan los 3 movimientos principales: giro, alabeo y cabeceo, lo que permite dar coordenadas al centro óptico del sensor láser, relacionando los orígenes de coordenadas GPS y del láser (figura 13).

La frecuencia de estos sistemas está entre 50 y 200 Hz, pero los valores más frecuentes oscilan entorno los 80 Hz (Martínez, 2008).

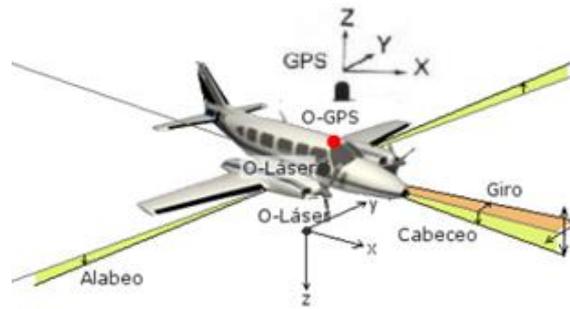


Figura 13: Esquema del Sistema De Navegación Inercial (Martínez, 2008).

➤ Sistema GPS

Este sistema tiene como objetivo determinar la posición de la plataforma, lo que permite alcanzar máximas precisiones si se sitúa un receptor GPS de doble frecuencia en el avión o cualquier otro medio de transporte aéreo, mientras que en tierra se establece una red que realiza una observación simultánea con el medio móvil. El sistema tiene una frecuencia entre 1 y 2 Hz.

El sistema trabaja en tiempo real y/o en posproceso; este último es de difícil aplicación en extensas áreas debido al radio de acción del radio-enlace. Para poder trabajar en sistemas posproceso es necesario establecer una red GPS en tierra, para lo cual se recomienda instalar más de una estación con una línea de base máxima de 20 km, y de igual manera, como se había mencionado antes no es recomendable trabajar con un número inferior de satélites igual o inferior a 4.

Estos 3 sistemas se instalan en la plataforma móvil, donde el sensor láser se instala con el sistema de referencia orientado según la dirección de vuelo (eje x), y con el eje Z hacia los objetos escaneados (parte inferior del avión) (Martínez, 2008).

Para complementar el vuelo se coloca una cámara digital, o de video, para tener información visual del área que está capturando el sensor láser. Se precisa también realizar una calibración de los equipos, con el propósito que tanto las coordenadas como el tiempo de los equipos coincidan unos con otros, para evitar errores sistemáticos producidos tanto por los equipos dispuestos en la plataforma al igual que errores de alineación de la unidad IMU y del sensor láser.

Para ello se realizan pruebas de vuelo sobre superficies elevadas y horizontales de grandes dimensiones, edificios con tejados horizontales con los lados de las fachadas perpendiculares entre sí.

La figura 14 permite visualizar la comprobación entre pasadas sobre un edificio para evitar los errores antes mencionados, se recomienda también realizar pasadas tanto en la misma dirección como en sentido inverso.

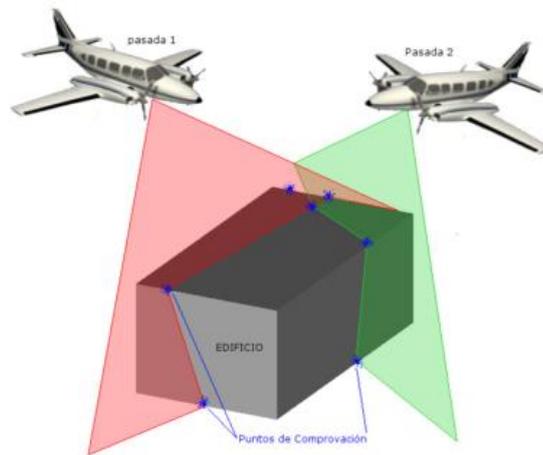


Figura 14: Esquema de calibración sobre un edificio (Martínez, 2008).

Una vez montados los equipos en la plataforma móvil, se capturan los datos en el sensor LiDAR aerotransportado y se escanea la superficie perpendicularmente al vuelo, lo que proporciona una información de la superficie del terreno en forma de densas nubes de puntos.

Es preciso recordar que LiDAR es un sensor activo, esto quiere decir que puede capturar información despreciando el ángulo solar e incluso es posible obtener información durante la noche, siempre teniendo como precaución en no realizar vuelos en condiciones de vientos fuertes, nevada, lluvia, niebla y elevada humedad.

Este sensor tiene la capacidad de penetrar cada pulso emitido a través de hojas o cubierta delgadas, para lo que se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Sobre una superficie sólida (edificios, terreno natural, etc.) el rayo se refleja sin problemas y vuelve al sensor emisor.

- En el agua, el rayo es absorbido y no vuelve al sensor, por lo que no se obtiene ninguna información, apareciendo un hueco sin datos, cuando hablamos de sensores aerotransportados. Pero si los estudios requieren que se realice batimetrías, es aconsejable hacer vuelos en épocas de aguas bajas donde se pueda conocer el caudal circundante por el río, o caso contrario, se puede utilizar el LiDAR batimétrico.
- Para la vegetación, el rayo choca en primer lugar con la copa del árbol, lo que ocasiona que parte del rayo vuelva al sensor y otra parte atraviesa la vegetación hasta llegar al suelo y vuelve al avión (García Gutiérrez, 2008).

El sistema guarda las alturas del primer y el último pulso, pero sistemas más modernos permiten que se puedan guardar capturas de hasta 4 retornos por pulso (figura 15), por lo que facilita medir la altura del terreno en zonas completamente cubiertas por la vegetación. La precisión vertical de tales medidas es inferior a los 15 cm, por lo que esta tecnología se puntúa mejor que las tecnologías tradicionales como la fotogrametría, ya que estas no proporcionan tal precisión (Fernández & Siabato, 2011).

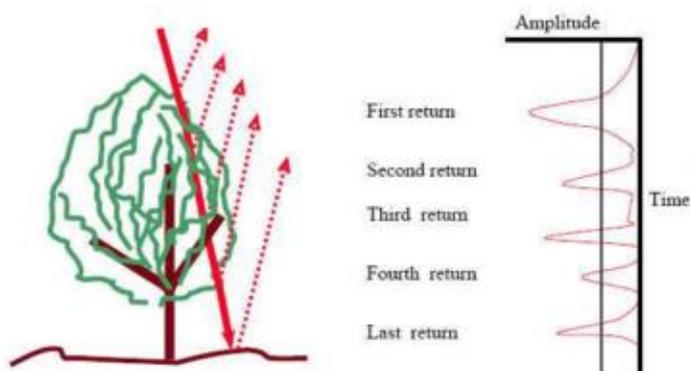


Figura 15: Retorno de un mismo punto (Martínez Blanco, 2016).

2.4. Tipos de datos LiDAR

El tratamiento y procesamiento de los datos LiDAR, con la mayoría de software, se realiza teniendo los datos brutos en formato *.las* (Log ASCII Standard). Este formato fue creado por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), y constituye un formato estándar de intercambio de nubes de puntos tridimensionales. Este formato almacena para cada punto de la nube los valores X, Y, Z, además de los valores de

intensidad y número de retorno, logrando también almacenar campos definidos durante el procesamiento de la información (ASPRS, 2013). Los datos son pasados a ficheros *.las* desde software provisto por los mismos fabricantes de hardware LiDAR, combinando datos de GPS, IMU y datos de rango de pulso laser para generar los datos definidos por las coordenadas X, Y y Z.

El formato *.las* es un archivo binario que contiene toda la información procedente del sistemas LiDAR y conserva toda la información según la propia naturaleza de los datos y del sistema de captura (García Gutiérrez, 2008).

El formato contiene datos binarios contenidos en 3 grupos.

- Bloque de cabecera pública: Incluye la información básica del fichero y datos genéricos como el número de puntos y las coordenadas de la extensión espacial que cubre la nube de puntos.
- Registro de longitud variable: Contiene diferentes tipos de datos incluyendo la proyección y los metadatos.
- Registro de nube de puntos.

Cabe tener presente que estos datos pueden variar de acuerdo a las versiones de los formatos *.las* (tabla 1), ya que desde el año 2003 la ASPRS ha realizado varias modificaciones del formato incluyendo en ellos distintas configuraciones para el registro de los puntos dato (Point Data Record Format, PDRF) (ASPRS, 2015).

Versión Formato <i>LAS</i>	PDRF	FECHAS
<i>LAS 1.0</i>	--	Mayo 2003
<i>LAS 1.1</i>	0, 1	Mayo 2005
<i>LAS 1.2</i>	0, 1, 2, 3	Septiembre 2008
<i>LAS 1.3</i>	0, 1, 2, 3, 4, 5	Octubre 2010
<i>LAS 1.4</i>	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	Noviembre 2011 Última actualización, Julio 2013.

Tabla 1: Versiones del formato *.las* (ASPRS, 2015).

La información que se dispone en la base de datos varía según el tipo de registro de los datos (PDRF); por ejemplo, el PDRF 0 no dispone del tiempo GPS mientras que el 1 sí, pero éste no considera la información asociada de las bandas R, G y B. Aunque también puede variar el tamaño de bytes o bits destinado para cada concepto. En el caso de los sistemas LiDAR de pulso discreto lo habitual es que conlleve el PDRF 3, de manera que para cada punto capturado se va a disponer de la siguiente información contenida en la tabla 2.

CAMPO	DESCRIPCIÓN
X	Coordenada planimétrica X
Y	Coordenada planimétrica Y
Z	Coordenada planimétrica Z
Intensity	Intensidad del punto laser en el sensor.
Return_Number	Número de retorno de ese pulso
Number_of>Returns	Número de retornos detectados para ese pulso
Scan_Direction_flag	Dirección del espejo del escáner
Edge_of_Flight_Line	Borde de línea de vuelo
Classification	Valor de clasificación asignada a ese pulso
Scan_Angle	Ángulo de escaneo
User_Data	Campo a rellenar según necesidad del usuario
Point_Source_ID	Identificador de pasada
GPS_Time	Tiempo GPS
R	Valor asociado al canal Rojo
G	Valor asociado al canal Verde
B	Valor asociado al canal Azul.

Tabla 2: Campos contemplados en el PDRF 3
(Martínez-Blanco, Bastarrika-Izagirre, & M^a Sánchez-Espeso, 2016).

Independientemente de las versiones de los formatos *.las*, las configuraciones mantienen una información básica descrita en la tabla 3.

El campo de clasificación tiene que ver con el valor de la clasificación; tanto el valor de 0 como el 1 hacen referencia a puntos sin clasificar, pero los dos se mantienen para compatibilizar el uso del popular software de clasificación TerraScan, así como se indica en ASPRS (ASPRS, 2008).

Dependiendo de la versión del formato *.las* se puede apreciar que existe una gran diferencia que radica en que han aumentado el número de categorías, ya que antes solo

había hasta 31 registros y ahora aparecen hasta 255 (tabla 4). Así mismo aparecen nuevas categorías, la 10 para vías férreas, 11 para carreteras, 13, 14, 15 y 16 referentes al tendido eléctrico, 17 para puentes y 18 para ruido alto.

```

reporting all LAS header entries:
file signature:      'LASF'
file source ID:     0
global_encoding:    1
project ID GUID data 1-4: 00000000-0000-0000-0000-000000000000
Versión de fichero. las al que hace referencia
version major.minor: 1.2
system identifier:  "
Programa utilizado para el procesamiento
generating software:  'TerraScan'
Fecha de creación
file creation day/year: 328/2015
header size:          227
offset to point data: 229
number var. length records: 0
Formato en el que se representan los datos
point data format:    1
point data record length: 28
Número total de retornos
number of point records: 2424990
Número total de retornos por cada eco
number of points by return: 2310640 105792 8217 341 0
scale factor x y z:   0.01 0.01 0.01
Coordenadas medias X, Y, Z
offset x y z:         0 0 0
Coordenadas mínimas y máximas del fichero
min x y z:            396000.00 4630000.00 -294.15
max x y z:            397999.99 4631999.99 2724.48
the header is followed by 2 user-defined bytes
LASzip compression (version 2.2r0 c2 50000): POINT10 2 GPSTIME11 2
reporting minimum and maximum for all LAS point record entries ...
X      39600000 39799999
Y      463000000 463199999
Z      -29415 272448
Valores mínimo y máximo para la intensidad, eje de vuelo, dirección de escaneo, cantidad de retornos, número de retornos, clasificación, ángulo de escaneo, datos del usuario, identificador de pasada y tiempo GPS.
intensity      0 255
return_number  1 4
number_of_returns 1 4
edge_of_flight_line 0 1
scan_direction_flag 0 1
classification 1 15
scan_angle_rank -27 34
user_data      173 255
point_source_ID 7 730
gps_time -74962297.442030 -43780496.628404
Número de puntos del primer, intermedio, último e individuales retornos.
number of first returns: 2310640
number of intermediate returns: 9172
number of last returns: 2309749
number of single returns: 2204571
Número de punto por cada retorno.
overview over number of returns of given pulse: 2204571 194238 24718 1463 0 0 0
Histograma de la clasificación (número de puntos por cada clase)
histogram of classification of points:
14 unclassified (1)
979567 ground (2)

```

662747 low vegetation (3)
130426 medium vegetation (4)
356496 high vegetation (5)
71710 building (6)
65480 noise (7)
24 road surface (11)
158496 wire guard (13)
30 tower (15)
+> flagged as withheld: 65357

Tabla 3: Información contenida en la cabecera de un fichero .las (Martínez Blanco, 2016).

La principal desventaja que presenta esta actualización es que la mayoría de elementos a registrar cartográficamente corresponden con puntos de suelo (2 = ground) tal como las carreteras, y si tienen altura como edificaciones o vegetación (6 = building; 4 = medium vegetation; 3 = high vegetation), lo que ocasiona un problema al querer realizar una cartografía básica.

Clase	LAS versión 1.4	LAS versión 1.2
0	Nunca clasificado	Nunca clasificado
1	No asignado	No asignado
2	Suelo	Suelo
3	Vegetación baja	Vegetación baja
4	Vegetación media	Vegetación media
5	Vegetación alta	Vegetación alta
6	Edificaciones	Edificaciones
7	Punto bajo (ruido)	Punto bajo (ruido)
8	Reservado	Punto clave
9	Agua	Agua
10	Vía férrea	Reservado definición ASPRS
11	Superficie pavimentada (carretera)	Reservado definición ASPRS
12	Reservado	Puntos solapados
13	Tendido	13-31 Reservado para la definición de la ASPRS
14	Cable de tendido	
15	Torre transmisora	
16	Conector de tendido	
17	Cubierta de puente	
18	Punto alto (ruido)	
19-63	Reservado	
64-255	Definido por el usuario.	

Tabla 4: Clasificación de la nube de puntos según ASPRS (ASPRS, 2015).

Partiendo de esta información, los datos LiDAR permiten clasificar esta información con fines cartográficos de zonas de características topográficas y geográficas. La entrega de datos LiDAR y productos derivados a los usuarios es la última etapa, y podrían clasificarse en nube de puntos y Modelos Digitales de Elevación (Fernández & Siabato, 2011).

➤ Nube de puntos

Al hablar de la nube de puntos podemos distinguir a la nube de puntos irregular que corresponde a los puntos LiDAR originales, es decir, los puntos LiDAR están generalmente clasificados en una categoría. Así también podemos hablar de la nube de puntos clasificada, que se obtiene a partir de algoritmos de clasificación automática aplicados a la nube de puntos original. La función de estos algoritmos se clasifica cada punto de acuerdo a su posición relativa con respecto a los puntos más cercanos dentro de la nube.

Y finalmente se distingue la imagen de intensidades que se obtienen a partir de la amplitud de la señal que retorna al sensor después de rebotar en la superficie terrestre. Esta imagen de intensidades permite realizar distinciones entre superficies (Fernández & Siabato, 2011).

➤ Modelos Digitales de Elevación (MDE)

- Modelo Digital de Superficie (MDS): se obtiene a partir del primer pulso, sobre el cual se pueden distinguir las alturas de las construcciones, vegetación, puentes, autos, etc.
- Modelo Digital del Terreno (MDT): se obtiene a partir del último pulso recibido, eliminando los puntos que no pertenezcan al terreno, obteniendo un modelo sin edificios, sin vegetación y demás objetos que hayan sido capturas sobre la superficie del terreno al momento del vuelo (figura 16).
- Modelo de Intensidades: se parte de la amplitud de la señal que vuelve al avión después de rebotar en la superficie terrestre obteniéndose una imagen de intensidades que permite realizar distinciones entre superficies, identificando carreteras, etc.

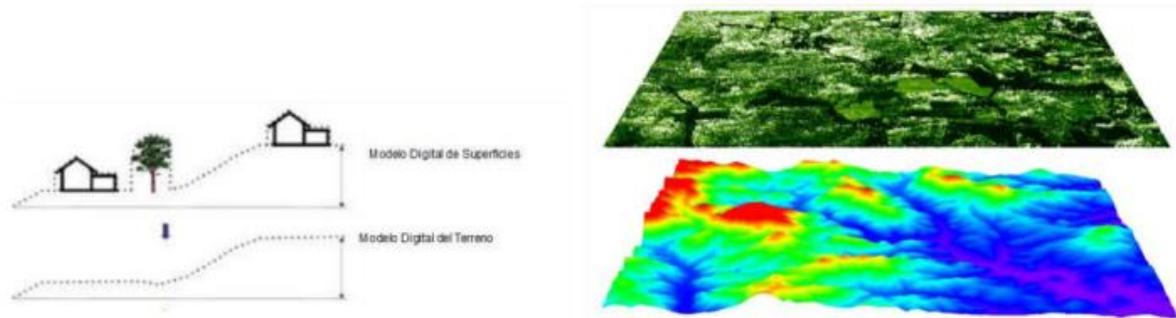


Figura 16: Modelo Digital de Superficie (MDS) y Modelo Digital de Terreno (MDT) (Márquez, 2014).

2.5. Disponibilidad de datos

En la actualidad hay muchas organizaciones que están utilizando el sistema LiDAR en diversos procesos. La tendencia cada vez es más creciente en el uso y disponibilidad de datos LiDAR, para ello se plantea la necesidad de poder incorporar estos datos a las infraestructuras de datos espaciales de forma rápida y eficiente, centralizando la información y permitiendo el acceso a estos datos a todos los usuarios, sin tener la necesidad que sean expertos en tratamiento de nubes de puntos.

A pesar de su corto tiempo del sistema LiDAR en el medio social, se ha realizado la cobertura de grandes zonas con vuelos utilizando el sensor LiDAR para obtener información digital de primera mano. A continuación, se describe brevemente la disponibilidad de datos tanto de nivel local, nacional e internacional.

2.5.1 Nivel Autonómico

El Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC) proporciona datos LiDAR actualmente que corresponden al proyecto LIDARCAT, teniendo las características que recoge la tabla 6.

La nube de puntos de los datos LiDAR del proyecto LiDARCAT ha sido clasificada automáticamente y únicamente editada manualmente la clase terreno. La figura 17 presenta la cobertura LiDAR en Cataluña según clasificación de los puntos de acuerdo a las fechas de vuelos.

Densidad nominal (p/m ²)	0,5
Fechas de Cobertura	Entre 2008 y 2011 (los datos llevan fecha de vuelo y tiempo GPS absoluto)
Distribución de datos	2 x 2 km
Versión formato <i>las</i>	1.2
Exactitud altimétrica con un error medio cuadrático	< 15 cm
Paso de malla (m)	2
Coordenadas	UTM-31
Sistema Geodésico de referencia	ETRS89
Altitudes ortométricas y referidas al geode	EGM08D595
Tamaño de pixel de ortofoto (cm)	25 o 50

Tabla 5: Características datos LiDAR ICGC (ICGC, 2016).

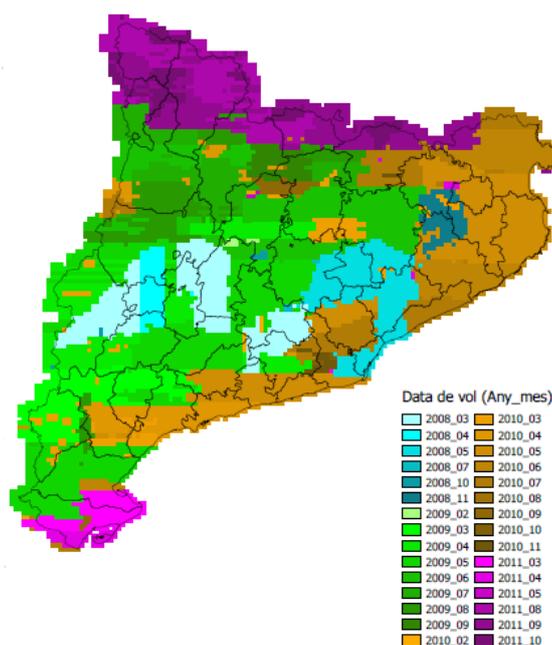


Figura 17: Clasificación de vuelos LiDAR por fechas de vuelo según ICGC (ICGC, 2016).

2.5.2 Nivel Nacional

El Instituto Geográfico Nacional (I

GN), a través del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), proporciona cobertura ortofotogrametría de todo el territorio español, con las características que recoge la tabla 7

y el plan de vuelos que aparece en la figura 18. La nube de puntos LiDAR ha sido clasificada automáticamente y coloreada en RGB a partir de las ortofotos del PNOA.

Densidad Nominal (p/m²)	0,5
Fechas de Cobertura	Entre 2008 y 2012 (los datos llevan fecha de vuelo y tiempo GPS absoluto)
Distribución de datos	2 x 2 km
Versión formato <i>laz</i>	1.2 (formato de compresión de ficheros <i>las</i>)
Exactitud altimétrica con un error medio cuadrático	< 20 cm
Paso de malla (m)	2
Coordenadas	UTM correspondiente a cada fichero
Sistema Geodésico de referencia	ETRS89
Tamaño de píxel de ortofoto (cm)	25 o 50

Tabla 6: Características de datos LiDAR a nivel nacional (IGN) (PNOA, 2015).

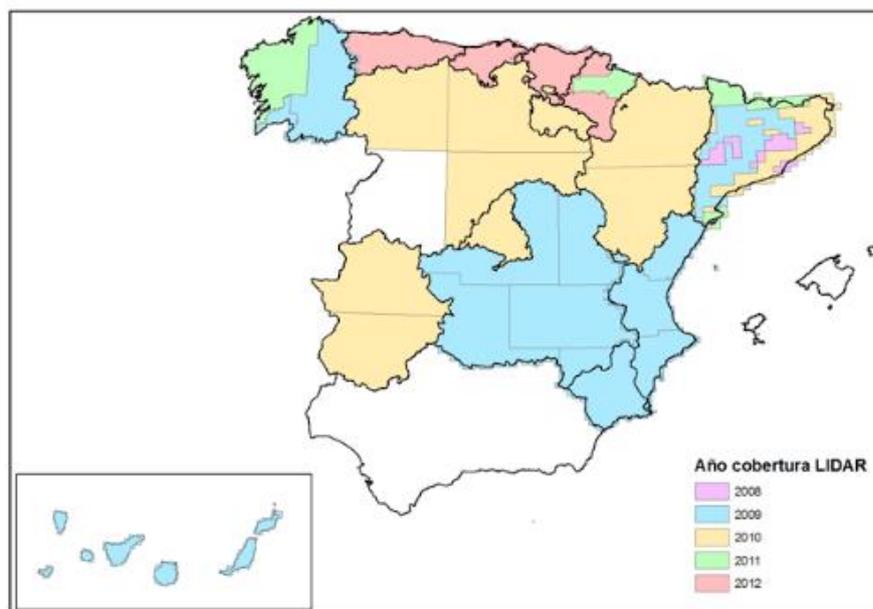


Figura 18: Clasificación de vuelos LiDAR según PNOA (PNOA, 2015).

2.5.3 Nivel Europeo

En la tabla 8 se recogen las páginas web que se han podido encontrado de portales donde aparece información LiDAR disponible de países de Europa.

PAÍS	PORTALES
UNIÓN EUROPEA	http://www.eurogeoinfo.org/national-spatial-data-infrastructures
ALEMANIA	http://www.geoportal.de
FRANCIA	http://www.geoportail.gouv.fr/donnees http://professionnels.ign.fr
HOLANDA	https://data.overheid.nl
PORTUGAL	http://snig.igeo.pt/portal
REINO UNIDO	https://www.geomatics-group.co.uk/GeoCMS/Order.aspx http://data.gov.uk/

Tabla 7: Portales con información LiDAR a nivel Europeo (Márquez, 2014).

2.5.4 Nivel Internacional

La gran utilidad asociada a los datos LiDAR en los diferentes campos ha hecho que se requieran cada vez en mayor cantidad, lo que ocasiona que estos datos en algunas regiones del mundo aún sea muy costoso conseguirlas y solo hay algunos sitios web que proporcionan acceso a la descarga de los datos de forma gratuita, la mayoría de Estados Unidos, siendo éste el país que más datos LiDAR produce y ofrece, tanto por parte Federal como por las Universidades en sus investigaciones. La tabla 9 muestra algunos portales internacionales de fuera de Europa que ofrecen datos LiDAR.

LOCALIDAD	PORTALES
CANADA	http://data.gc.ca
ESTADOS UNIDOS	http://www.data.gov http://earthexplorer.usgs.gov http://www.csc.noaa.gov/digitalcoast/data/coastallidar http://datagateway.nrcs.usda.gov http://www.redarrowmaps.com/lidarportal
GLOBAL (varias empresas que ofrecen acceso a datos LiDAR)	OPEN TOPOGRAPHY http://opentopo.sdsc.edu/gridsphere/gridsphere?cid=geonlidar DIELMO http://www.lidar-online.com
ECUADOR	http://www.igm.gob.ec/index.php/en/ El Instituto Geográfico Militar de Ecuador ha incorporado a su plataforma el sistema LiDAR, pero aún no se pueden tener acceso a los datos LiDAR del país.

Tabla 8: Portales con información LiDAR a nivel internacional (Márquez, 2014).

2.6. Tipo de software para LiDAR

Es importante mencionar que en la actualidad la mayoría de los softwares que permiten el desarrollo cartográfico están incorporando herramientas que admiten la integración y manejo de los datos LiDAR, pero no todos permiten la manipulación de estos.

Existen diferentes herramientas, tanto comerciales como Open Source, para el tratamiento, clasificación y procesamiento de los datos LiDAR.

Aunque existen ya algunas propuestas de desarrollo de GIS basados en software libre, dichos sistemas aun no llegan a poder competir con las versiones comerciales.

a) Software comercial

Dentro de las plataformas comerciales tenemos a TerraScan, software líder en el mercado; este paquete se basa en algoritmos desarrollados por Axelsson, uno de los más utilizados para la clasificación de las nubes de puntos procedentes de sistemas aerotransportados, tanto a nivel nacional como estatal (TERRASOLID, 2016).

b) Software libre

A continuación se hará un breve resumen de los software libre para datos LiDAR, recopilado de IDAF (Márquez, 2014) y (Martínez Blanco, 2016).

- **GRASS GIS:** (Geographical Resources Analysis Support System), contiene herramientas relacionadas con el procesado de datos LiDAR, análisis de datos anómalos, detección de ejes, generación de superficies y conversión de datos.
- **SAGA GIS:** (System for Automated Geoscientific Analyses), consiste en diversas herramientas para manipular nubes de puntos, calcular atributos, reclasificar, extraer subconjuntos, mallado, interpolación, etc. También cuenta con un filtro adaptado de Vosselman (2001) para identificación de suelos.
- **DielmoOpenLiDAR:** Extensión de gvSIG 1.1.2 que permite el acceso, visualización, análisis y control de calidad de datos LiDAR originales, pudiendo visualizar a la vez grandes volúmenes de datos (formato *las* y BIN), superpuestos con otros geográficos.

- **BCAL LiDAR Tools:** (Biose Center Aerospace Laboratory), herramientas desarrolladas para procesado, análisis y visualización de datos LiDAR. Incluye una herramienta de filtrado basado en las diferentes alturas discriminando puntos de suelo y de vegetación. Están escritos en lenguaje de programación IDL (Interactive Data Language) y pueden usarse como extensión dentro del paquete de software para la teledetección de ENVI.
- **FugroViewer:** Se trata de un software diseñado para usar con LiDAR y otros conjuntos de datos raster y vector, incluyendo datos de fuentes fotogramétricas e IFSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar).
- **FUSION/LDV:** Desarrollado por el equipo de Modelos Forestales y Silvicultura de The United States Forest Service Pacific Northwest Research Station. Es un paquete informático diseñado para analizar aspectos forestales, aunque incluye herramientas para conversión, análisis y visualización de datos LiDAR. Permite realizar modelos de terrenos y de superficie de vegetación en 3D y fusión de datos LiDAR con imaginería tradicional en 2D. Extrae métricas de los datos LiDAR brutos.
- **MCC-LiDAR:** (Multiscale Curvature Classification for LiDAR data), procesa retornos discretos en ambientes boscosos y clasifica los puntos en terreno y no terreno usando el algoritmo MCC.
- **LAStools:** es un software desarrollado por Martin Isenburg para el procesamiento rápido de datos LiDAR. Es una colección de herramientas en comandos para clasificar, convertir, filtrar, rasterizar, triangular, crear contornos, poligonizar, extraer información sobre la cabecera de los archivos, entre otras cosas datos LiDAR, algunas aplicaciones para usos comerciales son de pago, por lo tanto no todos los comandos son de libre uso. Todas las herramientas pueden ser utilizadas vía GUI (acrónimo de Interfaz Gráfica de Usuario, en inglés), y están disponibles en el toolbox de ArcGIS, ERDAS IMAGINE y QGIS.

2.7. Herramienta LAStools

La página oficial de RAPIDLASSO GMBH, liderada por Martín Isenburg (Isenburg, 2016), menciona que las herramientas de procesamiento LAStools para datos LiDAR son ampliamente conocidas por sus velocidades de “vértigo” y una alta productividad, y ha

sido galardonada con el premio Geoespacial Foro Mundial del 2012, a la vez que fue elegida en segundo lugar como el producto más innovador en INTERGO 2012.

Este software combina algoritmos robustos con eficiencia y gestión de memoria inteligente para lograr un alto rendimiento para datos que contengan miles de millones de puntos. LAStools tiene como base la librería LASlib, realizada bajo la licencia LGPL (Lesser General Public License), permitiendo utilizarla en otros paquetes, incluso comerciales.

Las utilidades que presenta LAStools permiten gestionar formatos *laz*, archivos en los que se entregan datos *.las* en un formato comprimido. Se trata de una colección de alta eficiencia, lotes de secuencia de comandos y herramientas de múltiples núcleos de línea de comandos, que permiten clasificar, convertir, filtrar, raster, triangular, contorno, clip y hacer polígonos con datos LiDAR (solo mencionando unas pocas de las muchas funciones).

Entre las funciones más importantes destacan las de transformación de datos de formato *.las* a texto o shapefile (*shp*) y viceversa; la obtención de información de la cabecera de los mismo; la creación de índices espaciales; la generación de modelos digitales; la extracción de puntos de una determinada zona; la división o extracción de un punto del fichero, etc. Las funciones más importantes se muestran en la tabla 5.

Cabe señalar que esta herramienta está en continua actualización y personalización; todas estas actualizaciones se pueden encontrar en la página oficial de Rapidlasso (Martínez Blanco, 2016).

Estas herramientas pueden ejecutarse a través de una interfaz gráfica de usuario y están disponibles como cajas de herramientas de procesamiento LiDAR para las versiones de ArcGIS 9.3, 10.0, 10.2, 10.2, o 10.3; para las versiones de QGIS 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 o 2.10 y para ERDAS IMAGINE versiones 14.0 y 15.1 (Isenburg, 2016).

Es importante señalar que si bien se habla de un software de código abierto, no es totalmente de libre aplicación, representando esto un problema al trabajar con gran cantidad de datos en la nube de puntos, ya que para fines de estudio se puede trabajar hasta con archivos LiDAR de $1,5 \cdot 10^6$ puntos sin que se tenga ningún problema.

EJECUTABLE	DESCRIPCIÓN
<i>lasinfo.exe</i>	Ofrece información sobre el contenido del fichero <i>.las</i>
<i>lasview.exe</i>	Visualiza el contenido del fichero <i>.las</i> a modo de puntos o TIN
<i>las2las.exe</i>	Permite manipular los datos del fichero <i>.las</i> .
<i>txt2las.exe</i>	Transforma datos LiDAR en formato ASCII(.txt) a <i>.las</i>
<i>las2txt.exe</i>	Transforma datos LiDAR en formato <i>.las</i> a ASCII (.txt)
<i>las2shp.exe</i>	Transforma datos LiDAR en formato <i>las</i> a ESRI shapefile (.shp)
<i>shp2las.exe</i>	Transforma datos LiDAR en formato ESRI shapefile (.shp) a <i>.las</i>
<i>lasthin.exe</i>	Generaliza el número de puntos del fichero <i>.las</i>
<i>lastile.exe</i>	Divide el fichero original <i>.las</i> en tiles
<i>lasoverlap.exe</i>	Analiza la superposición de las líneas de vuelo
<i>lasnoise.exe</i>	Elimina los puntos altos o bajos que constituyen ruido
<i>lasclip.exe</i>	Permite partir el fichero original <i>.las</i> en uno o muchos polígonos
<i>lasboundary.exe</i>	Extrae los puntos que pertenecen a un polígono dado.
<i>lasmerge.exe</i>	Permite unir varios ficheros <i>.las</i> en uno solo
<i>lasduplicate.exe</i>	Elimina los puntos duplicados
<i>lassplit.exe</i>	Divide el fichero original <i>.las</i> según el valor de alguno de sus parámetros
<i>lasground.exe</i>	Extrae punto de suelo
<i>lasheight.exe</i>	Calcula la altura sobre el terreno de todos los puntos
<i>lasclassify.exe</i>	Clasifica los puntos en edificaciones y vegetación alta
<i>lascanopy.exe</i>	Calcula métricas necesarias en el ámbito forestal
<i>las2tin.exe</i>	Triangula los datos contenidos en un fichero <i>.las</i> generando un TIN
<i>las2dem.exe</i>	Rasteriza la información para generar MDE
<i>las2iso.exe</i>	Extracción de curvas de nivel
<i>laszip.exe</i>	Comprime y descomprime datos <i>.las</i>

Tabla 9: Algoritmos destacados de la herramienta LAsTools (Martínez Blanco, 2016).

3. CASO DE ESTUDIO

3.1. Metodología y datos

Para poder llevar a cabo una demostración de la gran utilidad que tienen los datos LiDAR aerotransportados en la Industria Minera, se ha tomado como área de estudio la concesión minera “El Padró” ubicada dentro del área de la Comunidad Autónoma de Cataluña, Provincia de Barcelona, Comarca del Bages, perteneciente al Municipio de Castellbell i el Vilar (ver figura 19 y anexo 1).

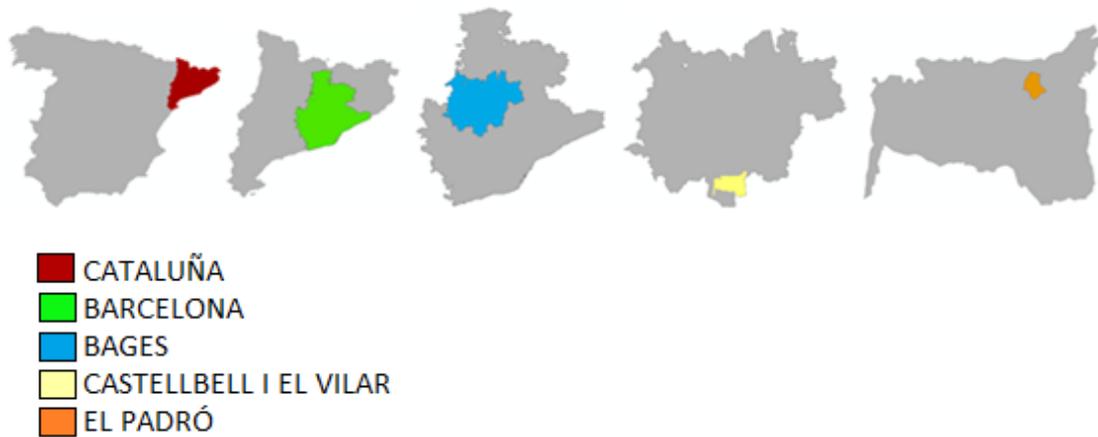


Figura 19: Localización concesión minera “El Padró” (Fuente propia).

La actividad minera en esta explotación, hasta donde se conoce, se inició en el año 1957, siendo conocida en sus inicios como la cantera de "Els Manresans". La actividad minera se denomina actualmente como "El Padró", con número de registro 684 (ver tabla 10).

Superfícies (El pla anual inclourà un planol amb delimitació de les superfícies indicades)				
1. Superfície minera autoritzada				39,48 ha
	Superfície sense afectació		15,18 ha	
	Superfície afectada pendent de restauració		21,22 ha	
2. Superfície ambiental autoritzada	Superfície restaurada des de l'inici de l'explotació	Restaurada any anterior	0,00 ha	
		Restaurada i amb fiança vigent, excloent la restaurada l'any anterior	1,75 ha	1,75 ha
		Restaurada i amb la fiança retornada	0,00 ha	
	Superfície ocupada per instal·lacions annexes a l'explotació (plantes benefici, aplecs, etc.)			1,33 ha
				39,48 ha

Tabla 10: Datos de superficie concesión minera “El Padró” (MADERAS Y ROCAS ORNAMENTALES S.L., 2016).

El titular de la autorización de la explotación es en la actualidad la entidad mercantil MADERAS Y ROCAS ORNAMENTALES, S.L., empresa del Grupo San Marino, que dispone de varias canteras en diferentes puntos de España, además de fuera de España: Marruecos, Chile, Turquía, etc.

Es una minería a cielo abierto, donde su actividad principal es la extracción de la caliza existente, para su comercialización como roca ornamental. En la tabla 11 se muestran los hitos de concesión que ha facilitado la propia empresa.

EL PADRÓ Nº 684		
COORDENADAS ETRS89		
FITAS	X	Y
1	405726.829	4611881.384
2	406037.472	4611779.259
3	405976.942	4611736.016
4	405982.120	4611512.118
5	405993.326	4611464.931
5A	406017.562	4611425.163
5B	406042.861	4611399.443
6	406093.969	4611357.158
7	406196.389	4611265.107
8	406172.688	4611198.482
9	406122.919	4611183.226
10	406064.106	4611177.936
11	406011.163	4611139.094
12	405954.027	4611072.670
13	405932.006	4611011.304
14	405895.675	4610993.807
15	405853.810	4610995.148
16	405795.467	4610959.364
17	405743.078	4611008.453
18	405684.314	4611053.111
19	405680.593	4611100.784
20	405688.047	4611152.050
21	405632.622	4611191.542
22	405546.542	4611278.405
23	405408.954	4611300.936
24	405486.579	4611379.844
25	405471.667	4611429.663
26	405484.044	4611502.014
27	405491.012	4611567.202
28	405523.321	4611668.026
29	405567.270	4611674.689
30	405588.083	4611703.452
31	405586.125	4611762.574
32	405620.284	4611786.263
33	405669.058	4612845.115
34	405671.239	4612877.269

Tabla 11: Hitos de concesión minera “El Padró”, coordenadas ETRS 89, UTM 31N (MADERAS Y ROCAS ORNAMENTALES S.L., 2016).

Este material es conocido tradicionalmente como caliza de San Vicente. Se trata, como es bien conocido por su larga trayectoria en el mercado, de una roca carbonatada muy compacta, fosilífera (principalmente alveolinas), de color gris a gris verdoso, de edad Eoceno y que desde el punto de vista comercial como roca ornamental admite todo tipo de terminación.

Los materiales susceptibles de ser explotados, al menos teóricamente, pertenecen a una potente serie litoestratigráfica de edad Eoceno que ocupa una gran extensión de terreno en las comarcas de Manresa y vecinas. Los estudios regionales le asignan una edad Biarriztiense a Priaboniense inferior.

Se trata de una monótona serie detrítica fina a muy fina en la que se intercalan, frecuentemente, paquetes calizos y areniscosos y, menos frecuentes, de conglomerados. Los tonos predominantes en esta serie son los rojizos, pero las calizas suelen ser grises y las areniscas beige a marrones. La capa de caliza tiene unos 12 metros de potencia. La producción se destina a la elaboración de bloques así como a piedra de escollera de los bloques no aptos para roca ornamental.

El arranque de la piedra calcárea para roca ornamental se realiza por medio de corte con hilo diamantado en frentes de explotación de 10 a 12 metros de altura, utilizando pólvora y cordón en casos particulares. Para el arranque de los estériles superiores, margas, se utilizan explosivos.

3.2. Datos empleados

Analizados los datos disponibles en los apartados anteriores, se ha decidido hacer uso de datos LiDAR y ortofotos proporcionados por PNOA, puesto que esta Nube de puntos PNOA Lidar viene coloreada en RGB, característica que los datos LiDAR ICGC no tienen. A continuación se describe cada uno de los datos utilizados. Todos los archivos se trabajan en un sistema de coordenadas ETRS89 / UTM zona 31N.

a) Datos LiDAR

Los archivos de datos LiDAR correspondientes a la zona de estudio han sido tomados de la base de datos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Como se puede visualizar en la figura 20, han sido seleccionados 2 archivos en formato *.laz* para

descargar, debido a que, la concesión minera “El Padró”, se encuentra dentro de 2 zonas de distribución de datos de 2x2 km, haciendo necesario la obtención de estos 2 ficheros.

Producto	Archivo	Formato	Tamaño(MB)	Seleccionar
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_400-4810_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	16,42	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_400-4812_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	18,88	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_400-4814_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	18,15	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_402-4810_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	33,33	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_402-4812_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	20,52	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_402-4814_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	16,42	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_404-4810_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	29,83	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_404-4812_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	21,31	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_404-4814_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	17,03	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_408-4810_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	17,22	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_408-4812_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	16,91	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2008_Lote_CAT_408-4814_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	16,19	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2010_Lote_CAT_400-4808_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	50,84	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2010_Lote_CAT_404-4808_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	39,27	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2010_Lote_CAT_408-4808_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	61,5	Añadir
LIDAR (laz 2x2 km)	PNOA_2010_Lote_CAT_408-4810_ORT-CLA-DOLLAZ	LAZ	35,85	Añadir

Figura 20: Datos LiDAR El Padró-PNOA (PNOA, 2015).

Las características de los datos LiDAR del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a través del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) se recogen en la tabla 12 y la figura 21 muestra los años en que se realizaron los vuelos. En todos los casos, la nube de puntos ha sido clasificada automáticamente y coloreada en RGB a partir de las ortofotos del PNOA.

Densidad Nominal (p/m²)	0,5
Fechas de Cobertura	Entre 2008 y 2012 (los datos llevan fecha de vuelo y tiempo GPS absoluto)
Distribución de datos	2 x 2 km
Versión formato laz	1.2 (formato de compresión de ficheros .laz)
Exactitud altimétrica con un error medio cuadrático	< 20 cm
Paso de malla (m)	2
Coordenadas	UTM correspondiente a cada fichero
Sistema Geodésico de referencia	ETRS89
Tamaño de pixel de ortofoto (cm)	25 o 50

Tabla 12: Características de datos LiDAR a nivel Nacional (IGN) (PNOA, 2015).

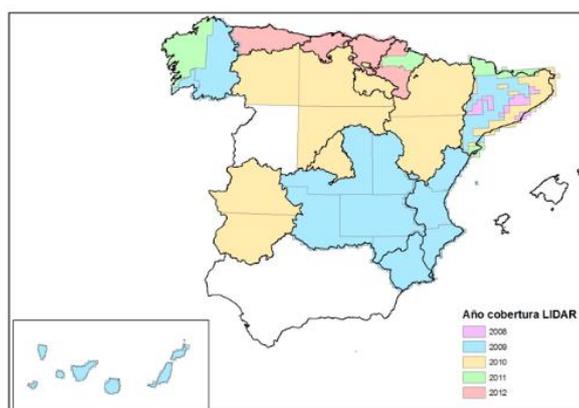


Figura 21: Clasificación de vuelos LiDAR según PNOA (PNOA, 2015).

3.3. Procesamiento de datos LiDAR con la herramienta LAsTools en QGIS.

Después de obtener la información de los datos LiDAR con los que se trabaja en aquí, en particular los correspondientes a este caso de estudio de la actividad extractiva El Padró, se procedió a manejar los datos LiDAR dentro de un SIG de código abierto.

Para este caso concreto se ha elegido utilizar QGIS por la disponibilidad que tiene para poder trabajar con datos LiDAR asociado a la herramienta LAsTools, con los cuales se puede crear MDE, MDT, MDS, visualizar datos LiDAR, hacer una imagen 3D de la nube de puntos, que resulta de gran aporte para la cantera El Padró ya que se puede visualizar los avances de la extracción minera; crear perfiles transversales para medir gradientes de nivel, hasta llegar a estimar volúmenes de tierra que se pretenda remover, por medio de la estructura forestal.

a) Conversión de ficheros *.laz* a *.las* de la concesión minera “El Padró”

Una vez configurado LAsTools dentro de QGIS, y para poder convertir los ficheros *.laz* a *.las*, se ha utilizado la herramienta *laszip*. Como muestra la figura 22, en la ventana de la herramienta se debe introducir el archivo *.laz* que se quiere convertir e introducir los parámetros directamente desde *additional command line parameters*, puesto que la naturaleza del algoritmo de QGIS es la compresión de *.las* a *.laz* (Ramos, 2016).

Esto se ha realizado para los 2 ficheros LiDAR que cubren la zona de la concesión minera “El Padró”.

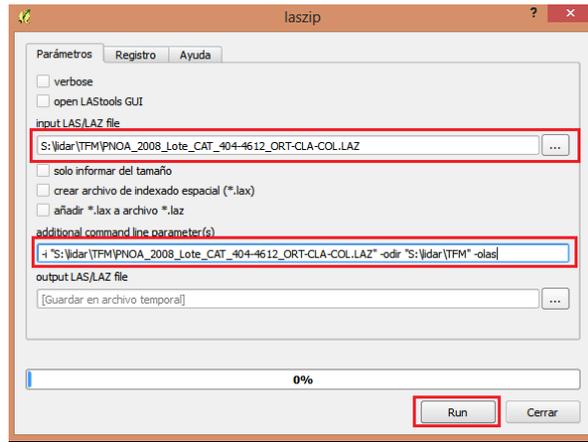


Figura 22: Conversión de ficheros PNOA *.laz* a *.las* (Fuente propia).

b) Visualización de metadatos del fichero LiDAR concesión minera “El Padró”

Una vez se tiene el fichero en formato *.las* de los archivos LiDAR, se procede a visualizar toda la información que contienen estos archivos; para ellos con la misma herramienta LAStools dentro de QGIS se utiliza el algoritmo *lasinfo*, siguiendo los pasos indicados en la figura 23 se carga el archivo *.las*, al igual que se procede a activar la ventana guía de LAStools para poder transformar este fichero a un archivo de extensión *.txt*.

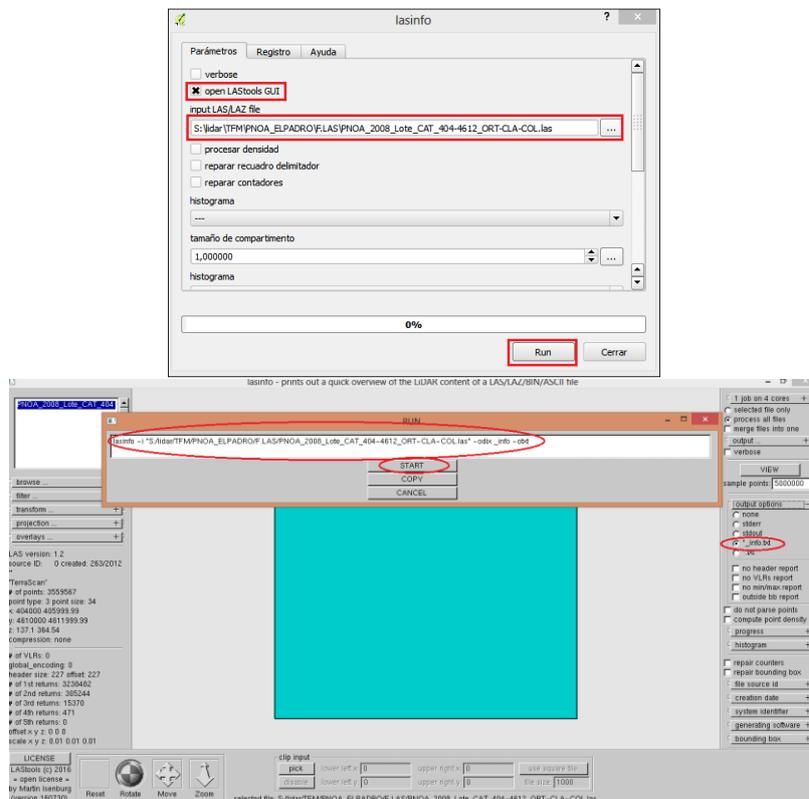


Figura 23: Obtener información del fichero PNOA *.las* (Fuente propia).

Luego de extraer la información de los ficheros *.las*, se obtienen las informaciones contenidas en la tabla 13 y 14, datos binarios que consisten en un bloque de cabecera, registros de longitud variable, y los datos de punto, etc. El bloque de cabecera contiene un bloque público seguida de registros de longitud variable. El bloque público recoge datos genéricos tales como números de punto y coordenadas límites. Los registros de longitud variable contienen tipos de variables de datos, incluyendo información de la proyección, los metadatos y los datos de aplicación del usuario.

reporting all LAS header entries:	
file signature:	'LASF'
file source ID:	0
global_encoding:	0
project ID GUID data 1-4:	00000000-0000-0000-0000-000000000000
<u>Versión de fichero las al que hace referencia</u>	
version major.minor:	1.2
system identifier:	"
<u>Programa utilizado para el procesamiento</u>	
generating software:	'TerraScan'
<u>Fecha de creación</u>	
file creation day/year:	263/2012
header size:	227
offset to point data:	229
number var. length records:	0
<u>Formato en el que se presentan los datos</u>	
point data format:	3
point data record length:	34
<u>Número total de retornos</u>	
number of point records:	3559567
<u>Número total de retornos por cada eco</u>	
number of points by return:	3238482 305244 15370 471 0
scale factor x y z:	0.01 0.01 0.01
<u>Coordenadas medias X, Y, Z</u>	
offset x y z:	0 0 0
<u>Coordenadas mínimas y máximas del fichero</u>	
min x y z:	404000.00 4610000.00 137.10
max x y z:	405999.99 4611999.99 364.54
the header is followed by 2 user-defined bytes	

reporting minimum and maximum for all LAS point record entries ...	
X	40400000 40599999
Y	461000000 461199999
Z	13710 36454
<u>Valores mínimos y máximos para la intensidad, eje de vuelo, dirección de escaneo, cantidad de retornos, número de retorno, clasificación, ángulo de escaneo, datos del usuario, identificador de pasada y tiempos GPS.</u>	
intensity	0 255
return_number	1 4
number_of_returns	1 4
edge_of_flight_line	0 1
scan_direction_flag	0 1
classification	1 13
scan_angle_rank	-28 28
user_data	134 193
point_source_ID	1 10
gps_time	37485.949517 40567.980883
<u>Valores mínimo y máximo para la visualización en RGB</u>	
Color R	0 65280
G	0 65280
B	0 65280
<u>Número de puntos del último retorno</u>	
number of first returns:	3238482
number of intermediate returns:	17733
number of last returns:	3236024
number of single returns:	2932672
<u>Número de puntos por cada retorno</u>	
overview over number of returns of given pulse:	2932672 576651 48158 2086 0 0 0
<u>Histograma de la clasificación (número de puntos por cada clase)</u>	
histogram of classification of points:	
67086 unclassified (1)	
232316 ground (2)	
973065 low vegetation (3)	
906364 high vegetation (5)	
40966 building (6)	
225266 noise (7)	
966163 keypoint (8)	
148341 wire guard (13)	
+ -> flagged as withheld: 67086	

Tabla 13: Información de la cabecera del fichero 1 PNOA .las concesión minera “El Padró” (Fuente propia).

reporting all LAS header entries:	
file signature:	'LASF'
file source ID:	0
global_encoding:	0
project ID GUID data 1-4:	00000000-0000-0000-0000-000000000000
<u>Versión de fichero las al que hace referencia</u>	
version major.minor:	1.2
system identifier:	"
<u>Programa utilizado para el procesamiento</u>	
generating software:	'TerraScan'
<u>Fecha de creación</u>	
file creation day/year:	263/2012
header size:	227
offset to point data:	229
number var. length records:	0
<u>Formato en el que se presentan los datos</u>	
point data format:	3
point data record length:	34
<u>Número total de retornos</u>	
number of point records:	3007004
<u>Número total de retornos por cada eco</u>	
number of points by return:	2889733 113481 3724 66 0
scale factor x y z:	0.01 0.01 0.01
<u>Coordenadas medias X, Y, Z</u>	
offset x y z:	0 0 0
<u>Coordenadas mínimas y máximas del fichero</u>	
min x y z:	406000.00 4610000.00 168.34
max x y z:	407999.99 4611999.99 617.56
the header is followed by 2 user-defined bytes reporting minimum and maximum for all LAS point record entries ...	
X	40600000 40799999
Y	461000000 461199999
Z	16834 61756
<u>Valores mínimos y máximos para la intensidad, eje de vuelo, dirección de escaneo, cantidad de retornos, número de retorno, clasificación, ángulo de escaneo, datos del usuario, identificador de pasada y tiempos GPS.</u>	
intensity	0 255
return_number	1 4
number_of_returns	1 4
edge_of_flight_line	0 1
scan_direction_flag	0 1
classification	1 13

scan_angle_rank	-30 23
user_data	130 191
point_source_ID	1 10
gps_time	37495.794778 40098.076184
<u>Valores mínimo y máximo para la visualización en RGB</u>	
Color R	0 65280
G	0 65280
B	0 65280
<u>Número de puntos del último retorno</u>	
number of first returns:	2889733
number of intermediate returns:	4654
number of last returns:	2888614
number of single returns:	2775997
<u>Número de puntos por cada retorno</u>	
overview over number of returns of given pulse:	2775997 218090 12557 360 0 0 0
<u>Histograma de la clasificación (número de puntos por cada clase)</u>	
histogram of classification of points:	
67473 unclassified (1)	
223573 ground (2)	
1070465 low vegetation (3)	
483610 high vegetation (5)	
9292 building (6)	
89915 noise (7)	
943277 keypoint (8)	
119399 wire guard (13)	
+ -> flagged as withheld: 67473	

Tabla 14: Información de la cabecera del fichero 2 PNOA .las concesión minera “El Padró” (Fuente propia).

c) Obtención de Modelos Digitales de Elevación

Como se ha mencionado anteriormente, los datos de LiDAR no se pueden procesar directamente en QGIS por las capacidades del programa, ya que no es capaz de abrir datos LiDAR ni en formato .laz comprimido, ni en formato .las descomprimido, y tampoco existe un complemento en el repositorio de plugins que permita manejar datos LiDAR.

Para ello se utiliza la herramienta LAsTools que se encuentra incorporada dentro de la caja de herramientas de QGIS. Para la obtención de los MDE, especialmente MDT y MDS a partir de los datos LiDAR se utilizan una serie de herramientas consecutivas incluidas en el paquete LAsTools.

➤ **Conversión de fichero .las a shp.**

Para la conversión de datos LiDAR en formato .las a un archivo del tipo *shapefile* (.shp), uno de los primeros pasos para trabajar LiDAR dentro de QGIS, se debe seleccionar el algoritmo *las2shp*, que permite la transformación en cuestión, siendo este último un formato en el cual se puede trabajar directamente en QGIS; el modo de procesamiento de los datos se visualiza en la figura 24.

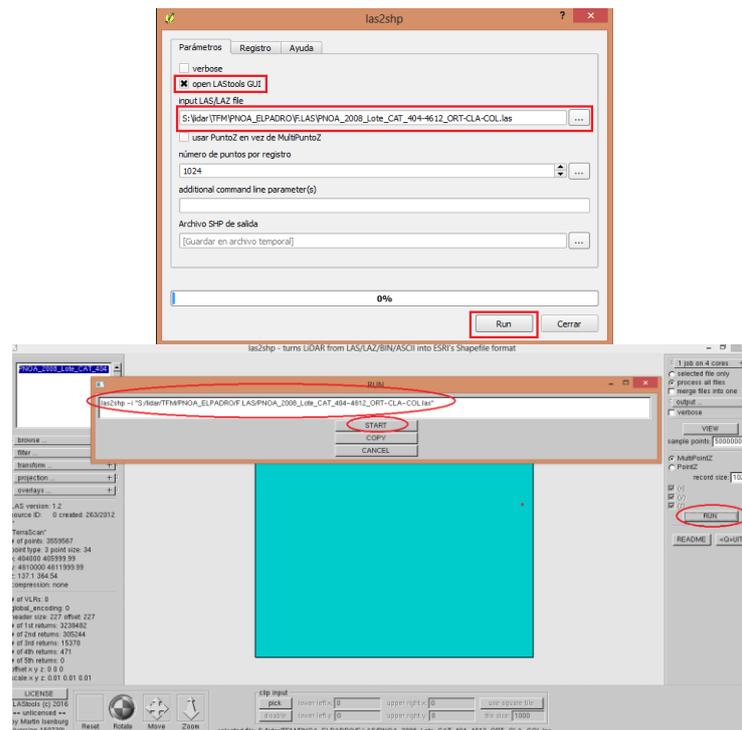


Figura 24: Transformar fichero .las en Shapefile “El Padró” (Fuente propia).

Para poder contrastar los resultados finales de los datos LiDAR de la concesión minera “El Padró”, es decir, la creación de los MDT y MDS, se ha hecho uso de ortofoto obtenida del PNOA, de 25 cm de resolución o tamaño de píxel, con resolución suficiente para obtener escalas cartográficas 1:5000, en formato .ecw. Lo que reduce considerablemente el tamaño de los archivos, manteniendo una alta calidad gráfica y permitiendo una rápida compresión y descompresión mediante un uso escaso de la memoria RAM. Su representación se muestra en la figura 25.



Figura 25: Ortofoto PNOA Municipio Castellbell i El Vilar (Fuente propia).

Para realizar el corte de la ortofoto PNOA con el polígono del área de estudio concesión minera El Padró, se ha utilizado la herramienta *clipper* del QGIS, como muestra la figura 26.

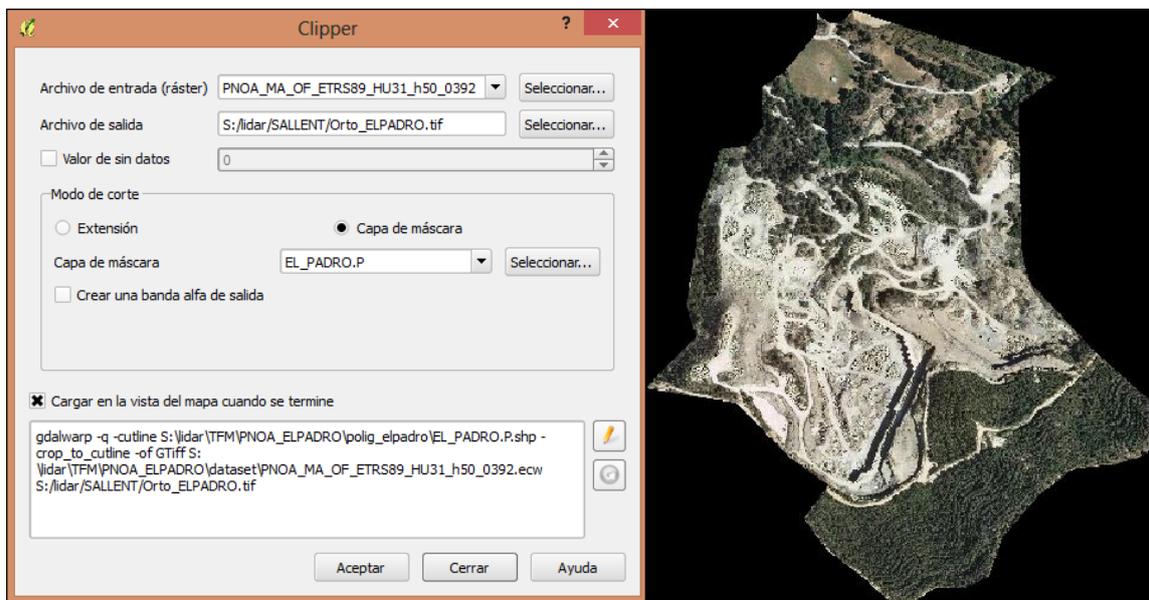


Figura 26: Corte Ortofoto PNOA con polígono de concesión minera El Padró (Fuente propia).

Una vez identificada el área de estudio, se han extraído las actividades extractivas de la base cartográfica de la Generalitat de Catalunya, el archivo en formato *.shp* de la concesión minera “El Padró”. Teniendo los datos LiDAR en formato *shp* (figura 24), la ortofoto del área de estudio (figura 25), y el polígono de la concesión minera, como muestra la figura 27, se puede crear un nuevo shapefile del tamaño y la ubicación que es de interés para este estudio, y se empieza a realizar el procesamiento de los datos para llegar a obtener los MDT y MDS de la actividad minera.



Figura 27: Ortofoto, Polígono Shp y LiDAR Shp “El Padró” (Fuente propia).

Como se mencionó en el apartado 3.3.1, se puede observar en la figura 27 como el área de estudio se encuentra intersecado por 2 ficheros LiDAR, de tal forma que se han tenido que realizar dos cortes de los archivos LiDAR referente al polígono de estudio y posteriormente se ha procedido a unir ambos archivos; a continuación se explica el proceso.

➤ **Corte de shp LiDAR con el shp concesión minera “El Padró”**

En este apartado se procede a realizar cada corte del fichero LiDAR con el shp de la concesión minera “El Padró”, y así poder delimitar la zona de estudio e ir clasificando la nube de puntos hasta llegar a generar los MDT y MDS. Para ello, como muestra la figura 28, se ha realizado el corte con el primer fichero LiDAR que interseca el polígono del área de estudio, y utilizando el algoritmo *lasview* de la herramienta LAsTools se puede visualizar el siguiente resultado de la figura 29.

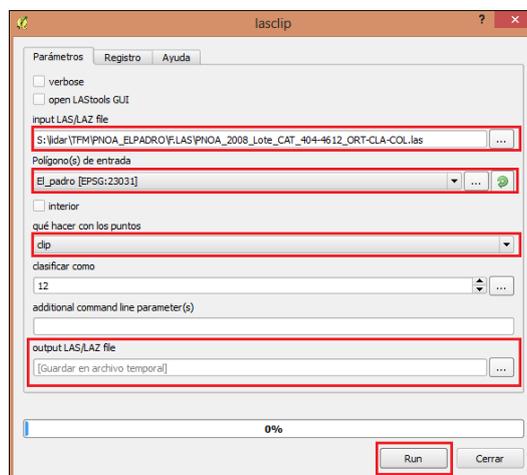


Figura 28: Corte de fichero 1 LiDAR respecto al polígono shp “El Padró” (Fuente propia).

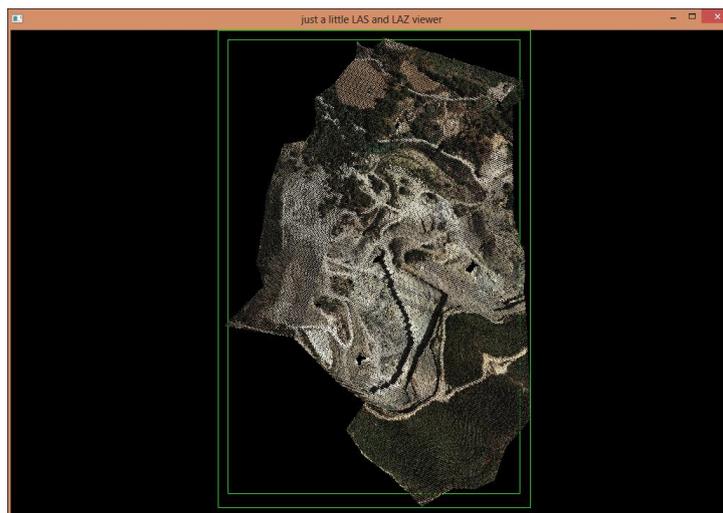


Figura 29: Visualización con *lasview* de corte fichero 1 LiDAR “El Padró” (Fuente propia).

Para realizar el corte del fichero 2 de LiDAR de la concesión se realiza el mismo procedimiento de la figura 27; de igual manera se utiliza el algoritmo *lasview* para visualizar el resultado (figura 30.)

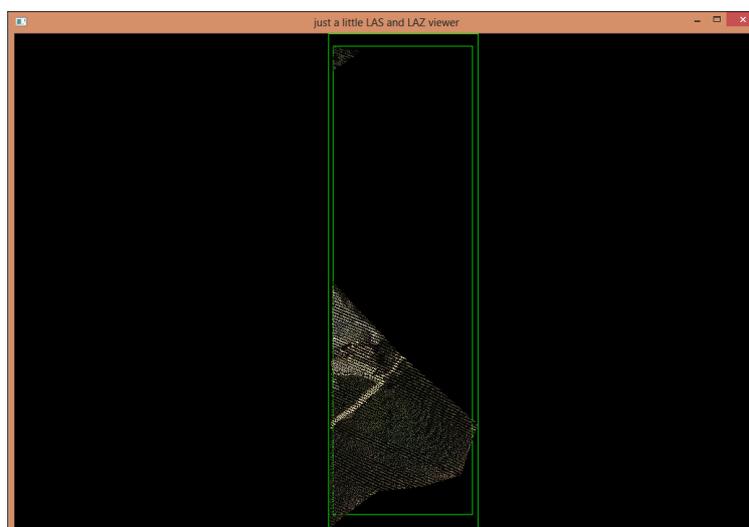


Figura 30: Visualización con *lasview* de corte fichero 2 LiDAR “El Padró” (Fuente propia).

- **Unión de fichero 1 y fichero 2 LiDAR “El Padró” utilizando algoritmo *lasmerge***

Para obtener un solo archivo LiDAR denominado LiDAR_ELPADRÓ, correspondiente al polígono de la concesión, se ha utilizado el algoritmo *lasmerge* (figura 31), función que ha unido los ficheros 1 y fichero 2 LiDAR, y se ha

obtenido un fichero LiDAR representativo del área de estudio y así poder seguir clasificando la nube de punto respecto al resultado final que serán MDT y MDS.

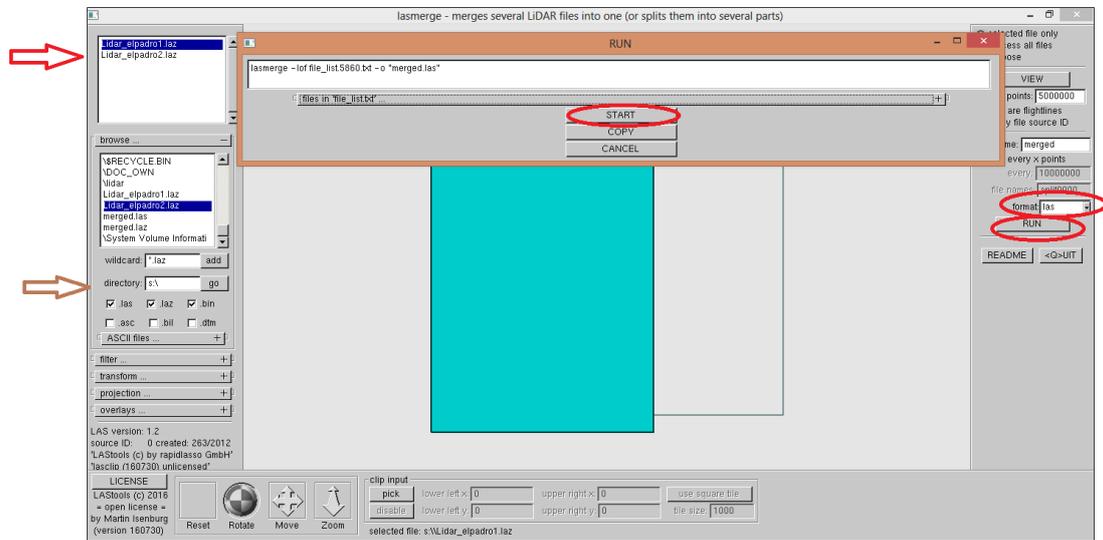


Figura 31: *Lasmerge* unión de fichero 1 y 2 para obtener LiDAR_ELPADRÓ (Fuente propia).

De igual manera se ha utilizado el algoritmo *lasview* para visualizar el resultado (figura 32).

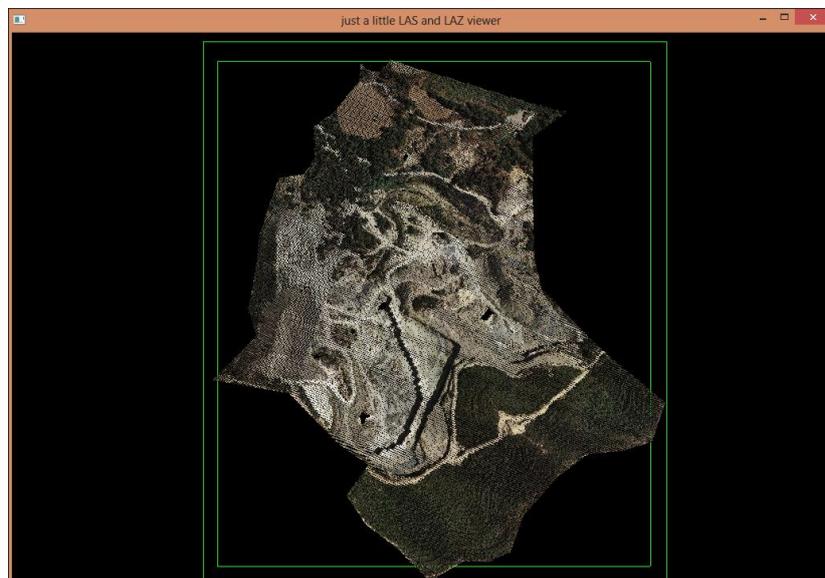


Figura 32: Visualización con *lasview* de fichero LiDAR_ELPADRÓ (Fuente propia).

➤ **Conversión de fichero LiDAR_ELPADRÓ .laz a shp.**

Al utilizar el algoritmo *lasmerge* el fichero que se ha creado LiDAR_ELPADRÓ, se encuentra en formato *.laz*, por lo cual, para poder seguir trabajando en QGIS, se ha tenido que transformar a shapefile, siguiendo los pasos que se han mencionado

en la figura 24, para luego cargar el archivo vectorial LiDAR_ELPADRÓ al software como muestra la figura 33.



Figura 33: Fichero LiDAR_ELPADRÓ en formato shp, visualización en QGIS (Fuente propia).

Una vez que se ha obtenido como resultado final LiDAR_ELPADRÓ, corte de los ficheros LiDAR originales, se ha procedido a extraer los metadatos de este fichero como muestra la tabla 15, para la orientación y organización de los pasos posteriores a seguir.

reporting all LAS header entries:	
file signature:	'LASF'
file source ID:	0
global_encoding:	0
project ID GUID data 1-4:	00000000-0000-0000-0000-000000000000
<u>Versión de fichero las al que hace referencia</u>	
version major.minor:	1.2
system identifier:	'LAStools (c) by rapidlasso GmbH'
<u>Programa utilizado para el procesamiento</u>	
generating software:	'lasmerge (version 160730)'
<u>Fecha de creación</u>	
file creation day/year:	263/2012
header size:	227
offset to point data:	229
number var. length records:	0
<u>Formato en el que se presentan los datos</u>	
point data format:	3
point data record length:	34
<u>Número total de retornos</u>	
number of point records:	339165

<u>Número total de retornos por cada eco</u>	325097 13651 410 7 0
number of points by return:	0.01 0.01 0.01
scale factor x y z:	
<u>Coordenadas medias X, Y, Z</u>	
offset x y z:	0 0 0
<u>Coordenadas mínimas y máximas del fichero</u>	
min x y z:	405411.23 4610959.61 187.97
max x y z:	406195.40 4611881.17 325.60
the header is followed by 2 user-defined bytes reporting minimum and maximum for all LAS point record entries ...	
X	40541123 40619540
Y	461095961 461188117
Z	18797 32560
<u>Valores mínimos y máximos para la intensidad, eje de vuelo, dirección de escaneo, cantidad de retornos, número de retorno, clasificación, ángulo de escaneo, datos del usuario, identificador de pasada y tiempos GPS.</u>	
intensity	0 0
return_number	1 4
number_of_returns	1 4
edge_of_flight_line	0 1
scan_direction_flag	0 1
classification	1 13
scan_angle_rank	-20 26
user_data	0 0
point_source_ID	0 0
gps_time	0.000000 0.000000
<u>Valores mínimo y máximo para la visualización en RGB</u>	
Color R	0 65280
G	0 65280
B	0 65280
<u>Número de puntos del último retorno</u>	
number of first returns:	325097
number of intermediate returns:	493
number of last returns:	325039
number of single returns:	311464
<u>Número de puntos por cada retorno</u>	
overview over number of returns of given pulse:	311464 26313 1360 28 0 0 0
<u>Histograma de la clasificación (número de puntos por cada clase)</u>	
histogram of classification of points:	
9147 unclassified (1)	
24155 ground (2)	

107750 low vegetation (3)	
65226 high vegetation (5)	
2146 building (6)	
9273 noise (7)	
101413 keypoint (8)	
20055 wire guard (13)	
+ -> flagged as withheld: 9147	

Tabla 15: Información de la cabecera del LiDAR_ELPADRÓ .laz (Fuente propia).

Al generar un nuevo fichero LiDAR, del área de estudio de interés, se ha podido observar según la tabla 15, toda la información disponible para este archivo, existiendo un menor número de puntos, pues la zona de cobertura de LiDAR es menor que los ficheros LiDAR originales, y para poder visualizar su contenido, se ha utilizado el software *Fugroviewer*, por medio del cual se ha podido identificar la nube de puntos según ortografía RGB, número de retornos, clasificación y altitud respectivamente, como muestra la figura 34.

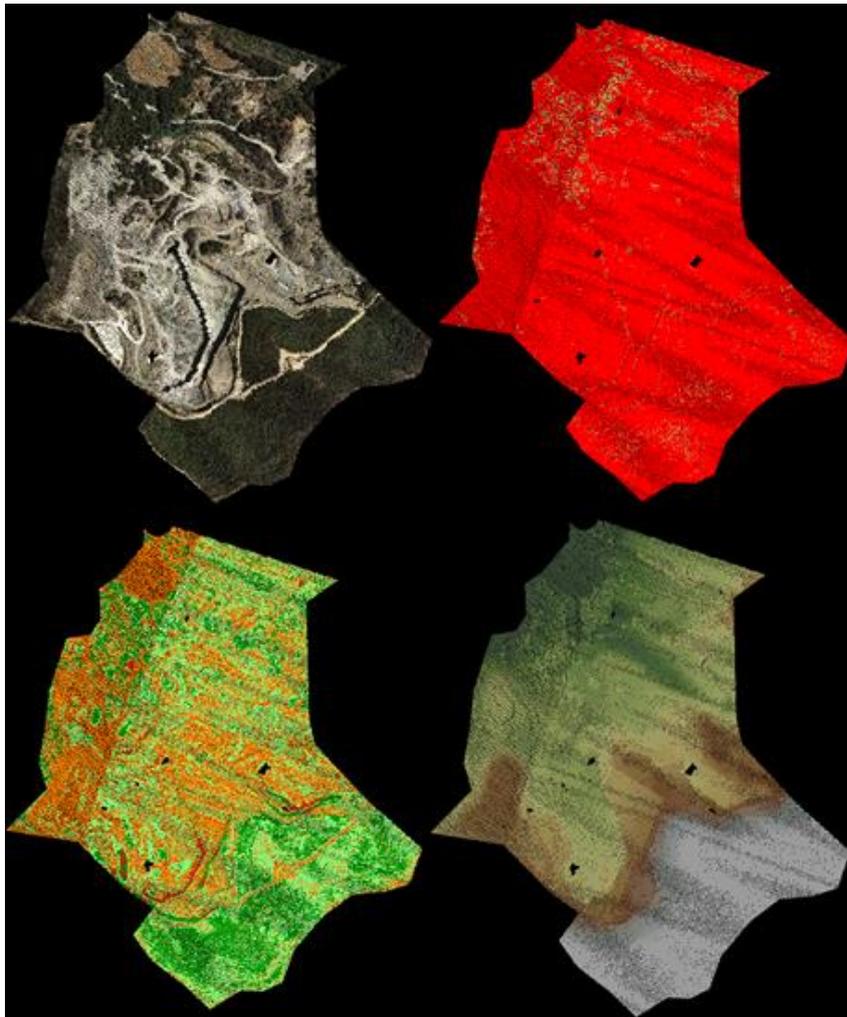


Figura 34: Representación fichero LiDAR_ELPADRO en fugroviewer (Fuente propia).

Para la obtención de los MDE, especialmente MDT y MDS a partir de los datos LiDAR_ELPADRO^o.las generado en la figura 32, se ha utilizado una serie de algoritmos consecutivos disponibles en la librería LAStools dentro de QGIS, para poder clasificar la nube de puntos del fichero actual, de acuerdo al número de retornos. A continuación, la figura 35 muestra el diagrama de flujo que se ha seguido.

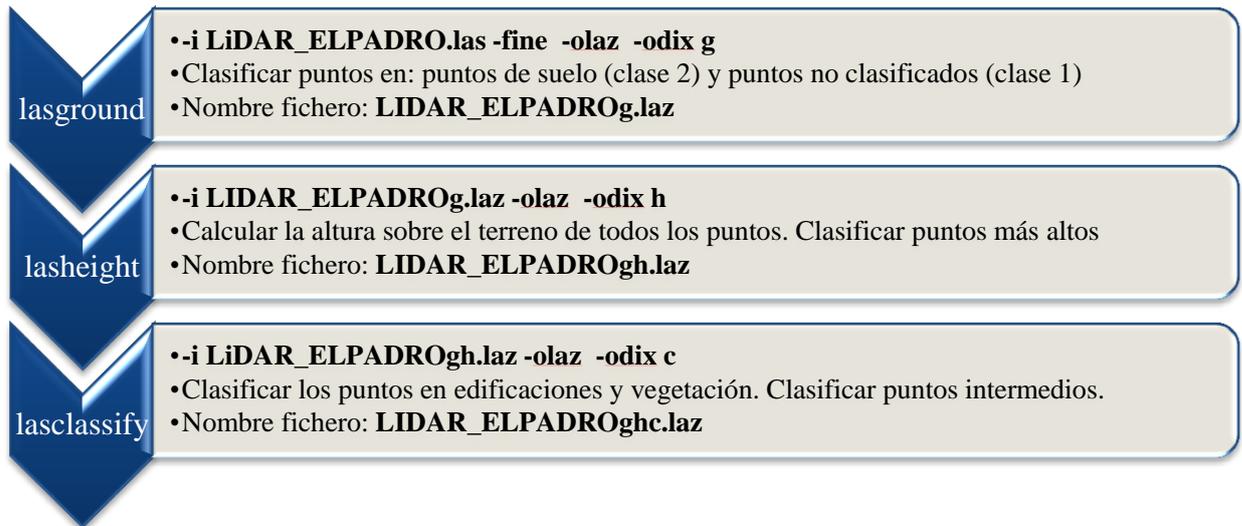


Figura 35: Diagrama de flujo clasificación de nube de puntos LiDAR_ELPADRO (Fuente Propia).

Según el diagrama de flujo de la figura 35, aplicado bajo la teoría de (Isenburg, 2014), se describe cada uno de los algoritmos utilizados y los comandos ejecutados.

- ***Lasground***

Según Isenburg para conseguir crear un MDT o MDS, primero se debe utilizar el algoritmo *lasground* que tiene como función principal, clasificar puntos en dos grupos: el suelo (último retorno) y el resto de puntos.

Este algoritmo permite clasificar según el tipo de terreno en el que se esté trabajando, en el caso de este estudio se clasifica el suelo natural como muestra la figura 36.

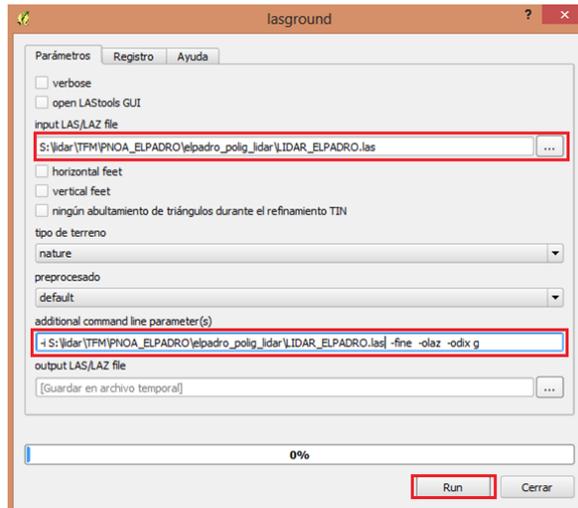


Figura 36: Clasificación Nube de Puntos LiDAR_ELPADRO con *lasground* (Fuente Propia).

- ***Lasheight***

Ahora se procede a clasificar los puntos más altos (primer retorno), con ello se facilita la ubicación de puntos erróneos; para ellos según la figura 37, se utiliza el algoritmo *lasheight*, a partir del fichero creado en la figura 36.

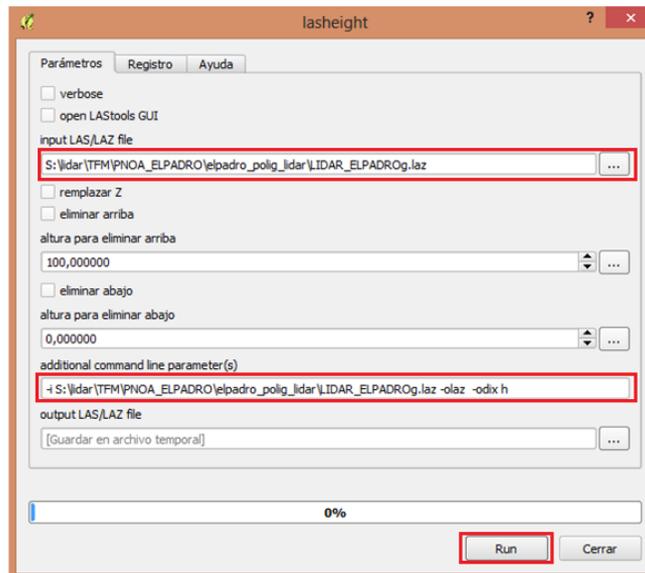


Figura 37: Clasificación nube de puntos LiDAR_ELPADROg con *lasheight* (Fuente propia).

- ***Lasclassify***

Al final, para terminar de clasificar la nube de puntos de acuerdo a sus retornos, es necesario clasificar los puntos intermedios, distinguiendo entre ellos edificios,

vegetación media y baja. Para esto se utilizará el algoritmo *lasclassify*, como muestra la figura 38, partiendo del archivo generado en la figura 37.

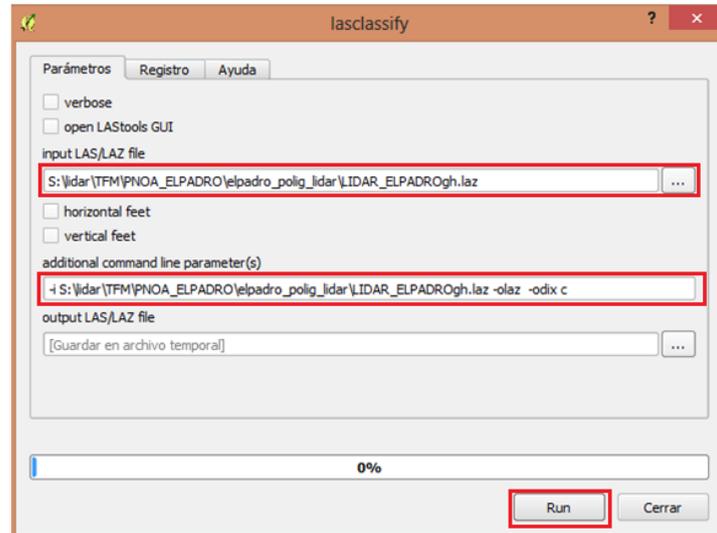


Figura 38: Clasificación nube de puntos LiDAR_ELPADROgh con *lasclassify* (Fuente propia).

Luego de la clasificación de puntos según el número de retorno, se ha obtenido como resultado final un fichero *LIDAR_ELPADROghc.laz* clasificado (ver anexo 2). A partir del cual se puede generar un MDE (modelo digital de elevación).

Utilizando el algoritmo *las2dem* se obtiene como producto final un archivo formato raster compatible con QGIS, con el cual se pueden hacer cálculos de pendientes, mapas de sombras, curvas de nivel y un modelo 3D de este fichero.

A continuación, la figura 39 muestra un diagrama de flujo para generar un archivo raster, utilizando el fichero *LIDAR_ELPADROghc.laz* clasificado, a partir del algoritmo *las2dem*.

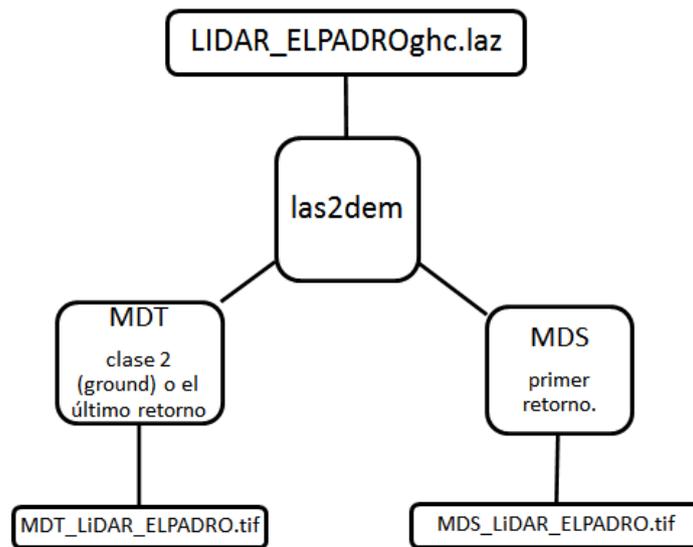


Figura 39: Diagrama de flujo obtención de MDS y MDT concesión minera “ELPADRO” (Fuente propia).

- **Las2dem**

La figura 40 muestra el procedimiento realizado con el algoritmo *las2dem* para generar el fichero MDS_LIDAR_ELPADRO.TIF (anexo 3). Este procedimiento consiste en generar un Modelo Digital de Superficie a partir del fichero LIDAR_ELPADROghc.laz clasificado en el apartado anterior. En la ventana de la figura 40, para obtener un MDS, en la sección filtro se ha elegido *keep_first*, es decir, los primeros puntos de retorno al sensor, aquellos que delimitarán la superficie de la concesión minera El Padró.

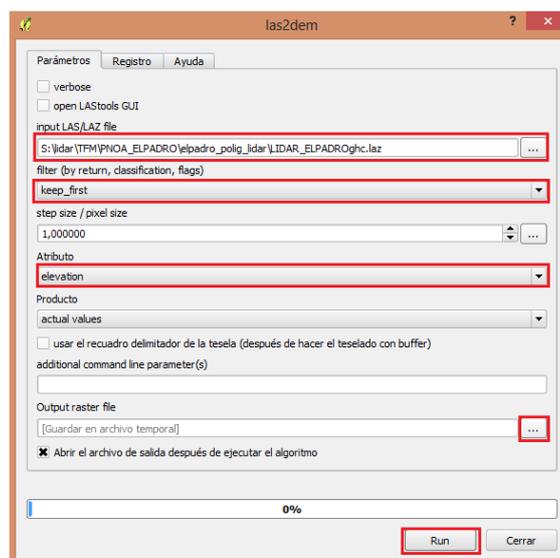


Figura 40: Algoritmo *las2dem* para genera MDS_LiDAR_ELPADRO (Fuente propia).

De igual manera para generar un Modelo Digital de Terreno, la figura 41 muestra el procedimiento realizado con el algoritmo *las2dem* para generar MDT_LIDAR_ELPADRO.TIF (anexo 4), a partir del fichero LIDAR_ELPADROghc.laz clasificado. En la sección filtro se ha elegido *keep_class 2*, es decir, la clase 2 (*ground*) o el último retorno al sensor, es decir, exclusivamente la superficie de terreno sin vegetación, construcciones etc.

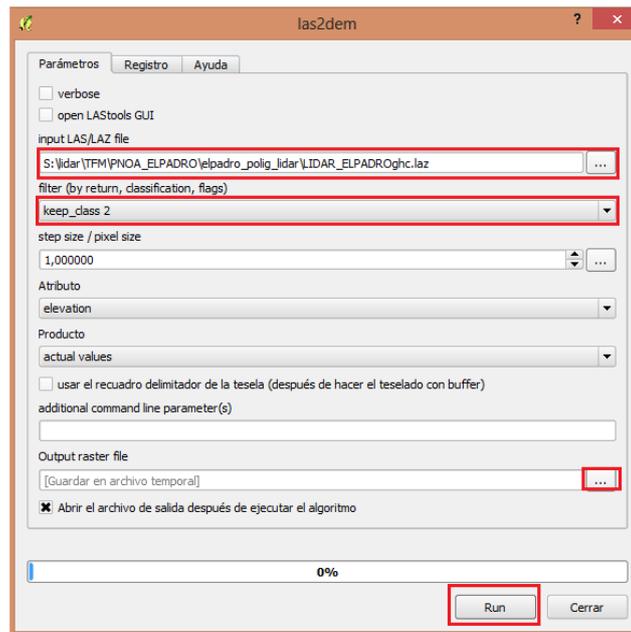


Figura 41: Algoritmo *las2dem* para generar MDT_LiDAR_ELPADRO (Fuente propia).

d) Visualización 3d de MDT y MDS de la concesión minera “El Padró”

Con las ventajas que brinda QGIS software libre, para poder trabajar con sus herramientas, gracias al plugin Qgis2threejs, es un plugin de Minoru Akagi que exporta los datos del terreno combinados con la imagen del canvas de QGIS y opcionalmente datos vectoriales a un archivo HTML que puede ser visualizado en 3D en cualquier navegador web que soporte WebGL. Este complemento hace uso de la Librería Three.js (Ramos, 2016).

Basta con introducir el archivo tipo Raster que contiene los datos de elevación, archivos creados en el apartado 3.3.3, MDT y MDS, el complemento utiliza los valores de elevación y los combina con la imagen de QGIS para crear un archivo HTML. La imagen 3D es dinámica (anexo 5), se puede ampliar, alejar, guardar la imagen que se está visualizando entre otras funciones.

e) Perfil de pendiente.

Con la nube de puntos clasificada, se puede elaborar un perfil de pendiente (anexo 6 y 7) gracias al software libre *FugroViewer*, para identificar la pendiente de los taludes, identificar la altitud de los árboles entre otras utilidades que brinda este software, una vez la nube de puntos haya sido clasificada por retornos.

3.4. Presupuesto

Para tener una idea del coste que supone la tecnología LiDAR aerotransportada para finalidades como la que en este trabajo se desarrolla, se ha contactado con la empresa GEOCAM INGENIERIA LTDA., ubicada en Bogotá – Colombia, la cual ofrece, dentro de su paquete de servicios, la ejecución y desarrollo de estudios cartográficos y/o topográficos mediante procesos fotogramétricos mediante plataformas no tripuladas (Unmanned Aircraft System UAS), dispuestas para el planeamiento, captura y procesamiento de información geográfica, con la calidad, precisión y densidad que cada cliente requiera.

Un UAS es un sistema formado por un conjunto de elementos que posibilitan el vuelo de una aeronave no tripulada. Los elementos implicados en estos sistemas determinaran diferentes tipos de plataformas UAS (figura 42).

Es decir, el tipo de estructura aérea seleccionada, la aviónica instalada a bordo, la estación de control utilizada, la forma en que se realice el enlace de datos, etc. conformarán diferentes tipos de arquitecturas UAS.

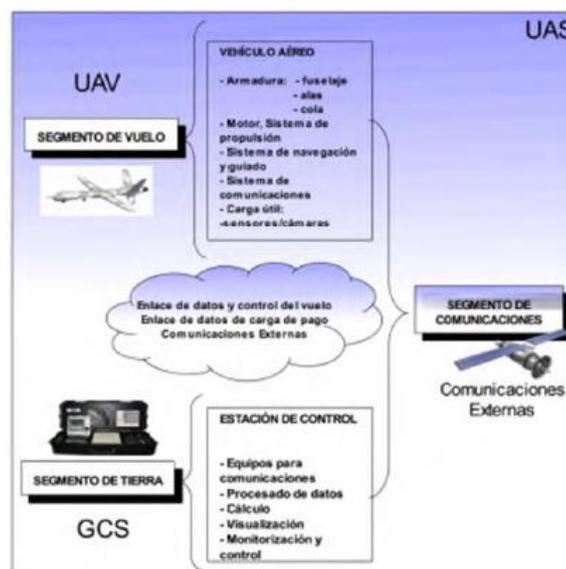


Figura 42: Esquema de elementos plataformas UAS (GEO CAM Ingeniería., 2014).

Se puede observar que los elementos se encuentran distribuidos en tres segmentos diferentes:

- Segmento de Vuelo: compuesto por el UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) y sus elementos abordo.
- Segmento de Tierra: compuesto por la “*Ground Control Station*” (GCS).
- Segmento de Comunicaciones: puede ser externo a la plataforma en el caso de utilizar servicios de comunicaciones externos como “Tetrapol”, “Iridium”, etc. o interno en el caso de utilizar tecnología “Wifi”, “zigbee”, etc.

Cada uno de estos segmentos, de diferente naturaleza, juega un papel muy importante en la arquitectura de un UAS. Por ejemplo, en el caso de no contar con servicios de comunicaciones externos, el segmento de comunicaciones quedaría definido a través de los elementos que componen los dos segmentos restantes.

Luego de conocer el trabajo realizado por la empresa, se ha decidido solicitar información técnica acerca del presente trabajo al igual que un presupuesto que supondría, un vuelo con la tecnología LiDAR en la concesión minera “El Padró”, información que será de gran aporte para la empresa minera pues los productos que la empresa GEO CAM ofrece son de actualidad. En el anexo 8 se podrá visualizar el presupuesto presentado con los productos finales requeridos, similares a los que se han desarrollado en el presente trabajo de investigación.

4. CONCLUSIONES

1. Se ha podido identificar la utilidad de la tecnología LiDAR aerotrasportada combinada con ortofotogrametría, ya que es una herramienta eficaz que mediante la obtención de la nube de puntos clasificada, puede ser de gran ayuda a la planeación minera. En el caso de estudio, concesión minera “El Padró”, se han obtenido productos cartográficos elaborados a lo largo de este trabajo que servirán para la localización, visualización, y conocimiento de lo que ocurre a lo largo de la actividad minera, pudiendo dar seguimiento de la explotación y poder proyectar futuras operaciones de la mina y minimizar impactos futuros.
2. La información LiDAR que se ha obtenido de PNOA ha sido de gran ayuda para realizar MDT y MDS de la concesión minera “El Padró”. Al ser archivos tipo raster pueden ser visualizados, calculados y manipulados en un software libre, para este estudio se ha utilizado QGIS, pudiendo así identificar características de terreno y superficiales del área minera que no son visibles con métodos tradicionales.
3. Se ha podido crear una visualización 3D a partir del MDT y MDS de la concesión minera “El Padró”, para tener una imagen similar a la realidad de las actividades que se están llevando a cabo dentro de la concesión minera.
4. Los perfiles creados a partir de datos LiDAR permiten conocer los gradientes altimétricos dentro de una concesión minera en sus diferentes orientaciones. Ello demuestra la utilidad de la información de este tipo de datos, de tal forma que se pueden hacer mediciones reales de la situación actual de la mina sin tener que ir a campo.

BIBLIOGRAFÍA

- ASPRS. (2008). LAS FORMAT VERSION 1.2. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/asprs_las_format_v12.pdf
- ASPRS. (2013). ASPRS Lidar Division Releases First LAS Domain Profile. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <https://www.asprs.org/press-releases/asprs-lidar-division-releases-first-las-domain-profile.html>
- ASPRS. (2015). LASer (LAS) File Format Exchange Activities – ASPRS. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <https://www.asprs.org/committee-general/laser-las-file-format-exchange-activities.html>
- Días, O. (2014). *LIDAR (light detection and ranging). Geosolutions consulting, Inc.* Panamá. <http://doi.org/10.1533/9780857098733.2.292>
- DiCYT. (2014). La tecnología láser LiDAR identifica minas de oro y canales hidráulicos romanos en el valle el río Eria - Noticias | iAgua. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <http://www.iagua.es/noticias/espana/dicyt/14/12/03/tecnologia-laser-lidar-identifica-minas-oro-y-canales-hidraulicos>
- Fernández, J., & Siabato, W. (2011). *Procesamiento y accesibilidad de datos LiDAR a través de aplicaciones distribuidas. Integración del estándar OpenGIS Web Processing Service y la Arquitectura GRID Computing.* Madrid, Spain.
- Gajardo, J. (2012). Taller Empleo del LiDAR para aplicaciones ambientales terrestres. In *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Las Tecnologías de la Información Geográfica en el contexto del Cambio Global* (p. 38).
- García Gutiérrez, J. (2008). *Remote Mining: Aplicando minería de datos a teledetección sobre LIDAR Índice general.* universidad de sevilla. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <https://www.lsi.us.es/docs/doctorado/memorias/Memoria-Invest-JGarcia.pdf>
- García Gutiérrez, J. (2011). *Intelligent techniques on LIDAR for environmental applications.* Universidad de Sevilla. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: http://fondosdigitales.us.es/media/thesis/2217/O_Tesis-PROV41.pdf
- GEO CAM Ingeniería. (2014). *Estudios cartográficos y/o topográficos mediante procesos fotogramétricos sobre plataformas UAS.* (V.0. No. DS-PR-05). Bogota.

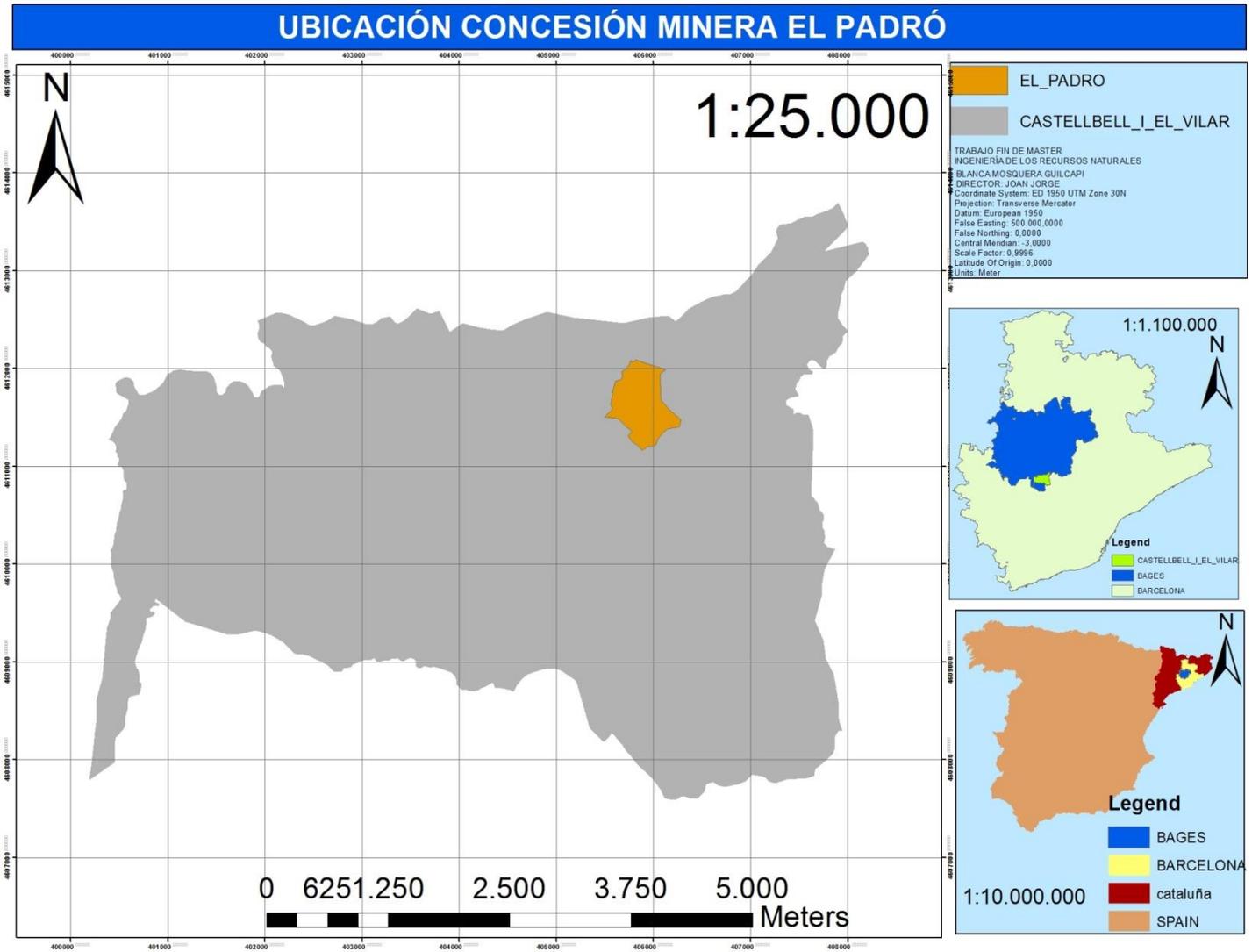
- ICGC. (2016). Datos lidar. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en:
<http://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Descargas/Elevaciones/Datos-lidar2>
- IGN. (2014). *Curso online de Teledetección, fotogrametría, LiDAR y Ocupación del suelo*. (Tema 13 No. Módulo Lidar).
- Isenburg, M. LAStools rapid software for LiDAR processing (2014). [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <http://lastools.org/download/lastools.ppt>
- Isenburg, M. (2016). LAStools | rapidlasso GmbH. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017].
Disponible en: <https://rapidlasso.com/lastools/>
- Killinger, D. K. (2014). 10 – Lidar (light detection and ranging). In *Laser Spectroscopy for Sensing* (pp. 292–312). <http://doi.org/10.1533/9780857098733.2.292>
- Lefsky, M., Cohen, W., Parker, G., & Harding, D. (2002). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience*, 52, 19. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en:
<https://academic.oup.com/bioscience/article/52/1/19/291259/Lidar-Remote-Sensing-for-Ecosystem-StudiesLidar-an>
- LiDAR México. (2012). Minería y LiDAR México. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017].
Disponible en: <http://www.lidar-mexico.com/lidar-mexico-exploracion-miner>
- MADERAS Y ROCAS ORNAMENTALES S.L. (2016). Concesión Minera “EL PADRÓ.”
Castellbell i El Vilar.
- Márquez, A. (2014). LiDAR Libre. In *LiDAR LIBRE de un perfil topográfico a la individualización de objetos en el terreno* (p. 40). Girona: IDAF- Innovación y Desarrollo Forestal.
- Martínez-Blanco, P., Bastarrika-Izagirre, A., & M^a Sánchez-Espeso, J. (2016). *10as JORNADAS DE SIG LIBRE Utilización de librerías geoespaciales libres para la clasificación de datos LiDAR*. País Vasco. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en:
<http://www.sigte.udg.edu/jornadassiglibre2016/jornadas-sig-libre/programa/>
- Martínez, E. (2008). *Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir de datos Láser Escáner Aerotransportado; aplicación a la Marisma del Parque Nacional de Doñana*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Martínez Blanco, M. (2016). *Evaluación y propuesta de metodologías de clasificación a partir del procesado combinado de datos LiDAR e imágenes aéreas georreferenciadas*.

- UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/8339/TesisMPMB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Maxwell, R. (2014). LiDAR and the Archaeology Revolution. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <https://www.gislounge.com/lidar-archaeology-revolution/>
- Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio. (2015). Obtención de la cartografía mediante tecnología LIDAR y ortofotografía. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/delimitacion-y-restauracion-del-dominio-publico-hidraulico/delimitacion-dph-proyecto-linde/estado-actual-proyecto-linde/>
- National Ocean Service. (2015). What is LIDAR. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>
- PNOA. (2015). Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <http://pnoa.ign.es/presentacion>
- Ramos, D. (2016). Cómo convertir ficheros LiDAR .LAZ a .LAS - MappingGIS. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: http://mappinggis.com/2016/08/como-convertir-ficheros-lidar-laz-a-las/#Como_convertir_de_LAZ_a_LAS_con_LASools_en_QGIS
- Rodríguez, O. (2009). *LiDAR VS. fotogrametría en la obtención de modelos digitales de elevaciones para estudios hidrológicos*. Universidad de Salamanca.
- TERRASOLID. (2016). Terrasolid Home. [en línea]. [Consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <http://www.terrasolid.com/home.php>

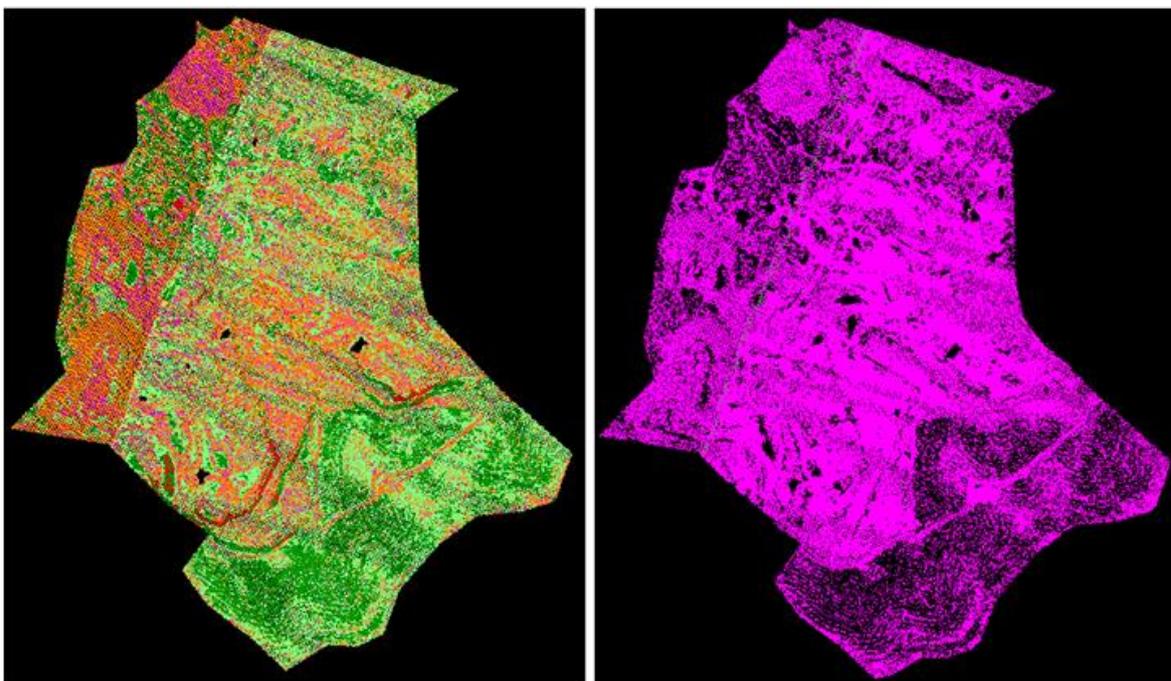
ANEXOS

Anexo 1: Mapa ubicación concesión minera “El Padró”	64
Anexo 2: Visualización en FugroViewer: (a) <i>lasground</i> , (b) <i>lasheight</i> , (c) <i>lasclassify</i>	65
Anexo 3: MDS concesión minera “El Padró”	67
Anexo 4: MDT concesión minera “El Padró”	67
Anexo 5: Visualización 3D de (a) MDS y (b) MDT de concesión minera “El Padró”	68
Anexo 6: Perfil de pendiente, área de explotación concesión minera “El Padró”	69
Anexo 7: Perfil de vegetación concesión minera “El Padró”	70
Anexo 8: Presupuesto levantamiento topográfico mediante tecnología UAV "	71

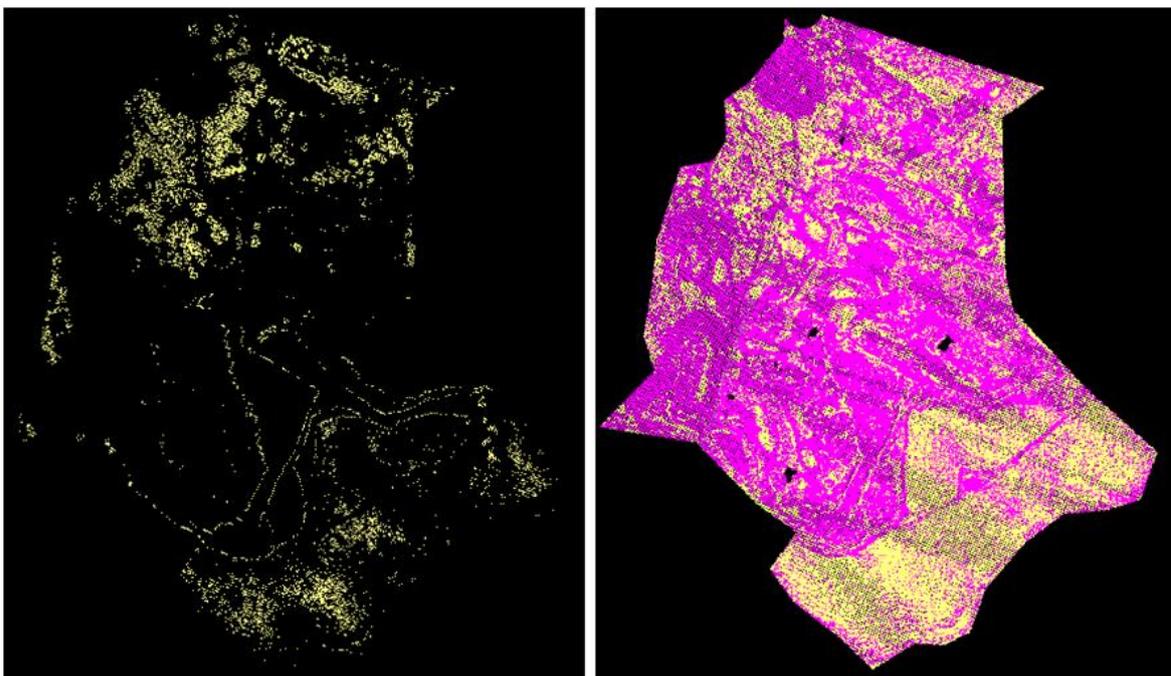
Anexo 1: Mapa ubicación concesión minera “El Padró”



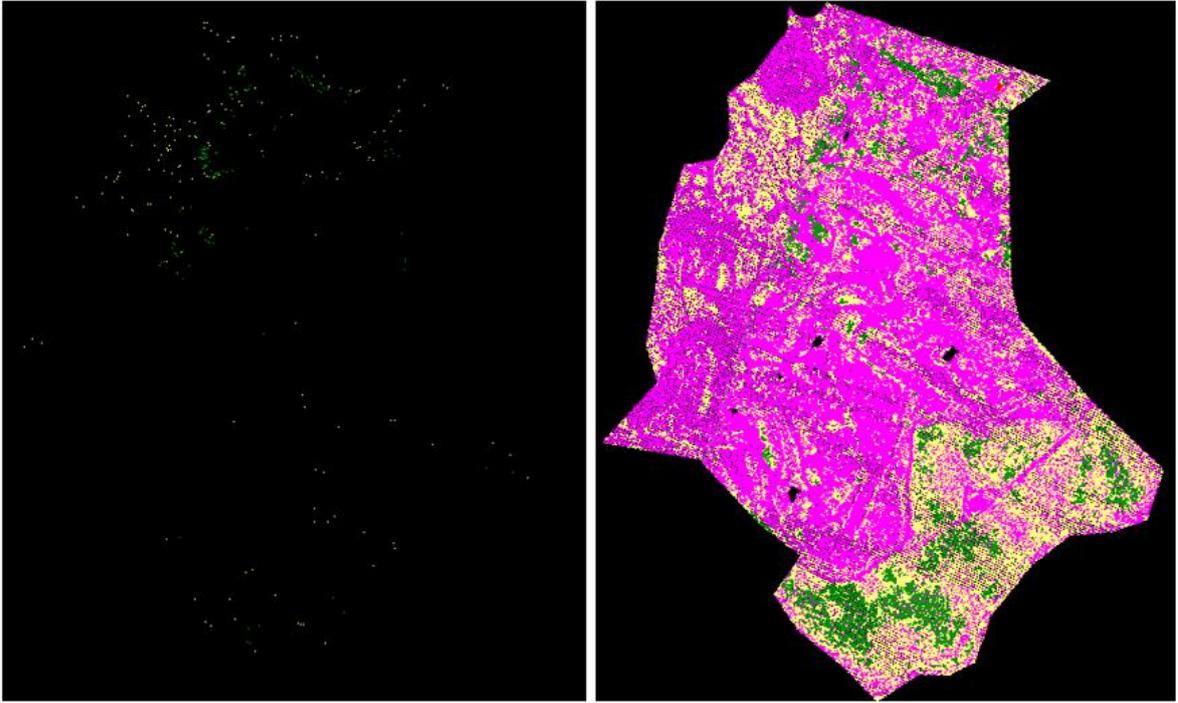
Anexo 2: Visualización en FugroViewer: (a) *lasground*, (b) *lasheight*, (c) *lasclassify*



(a)

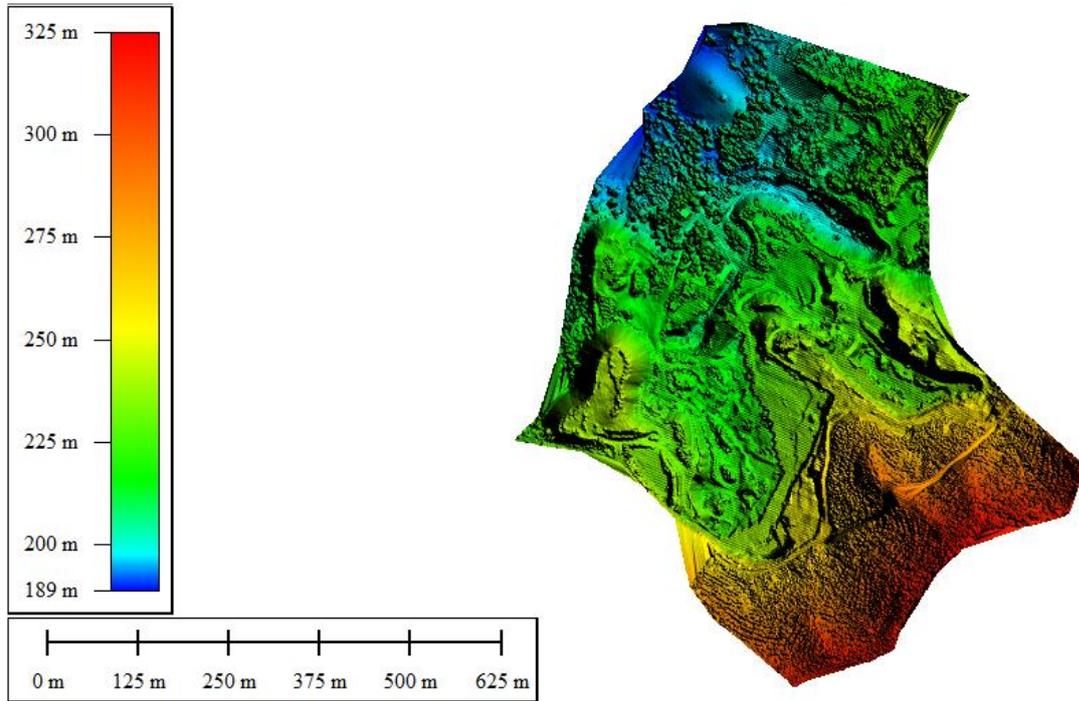


(b)

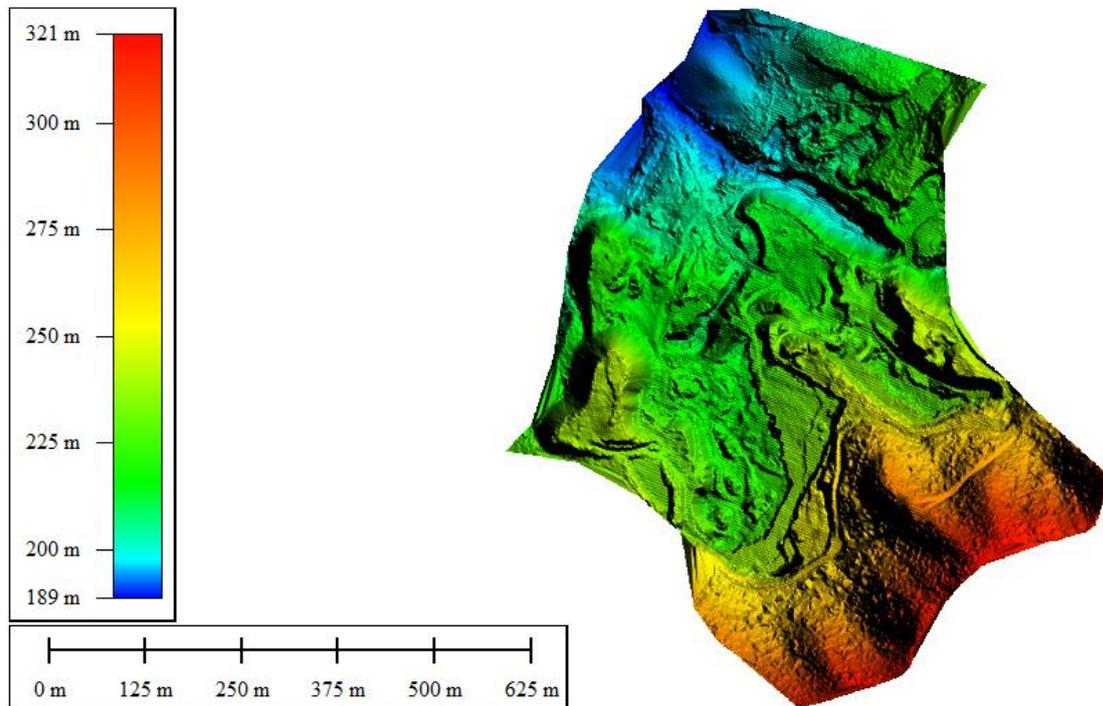


(c)

Anexo 3: MDS concesión minera “El Padró”

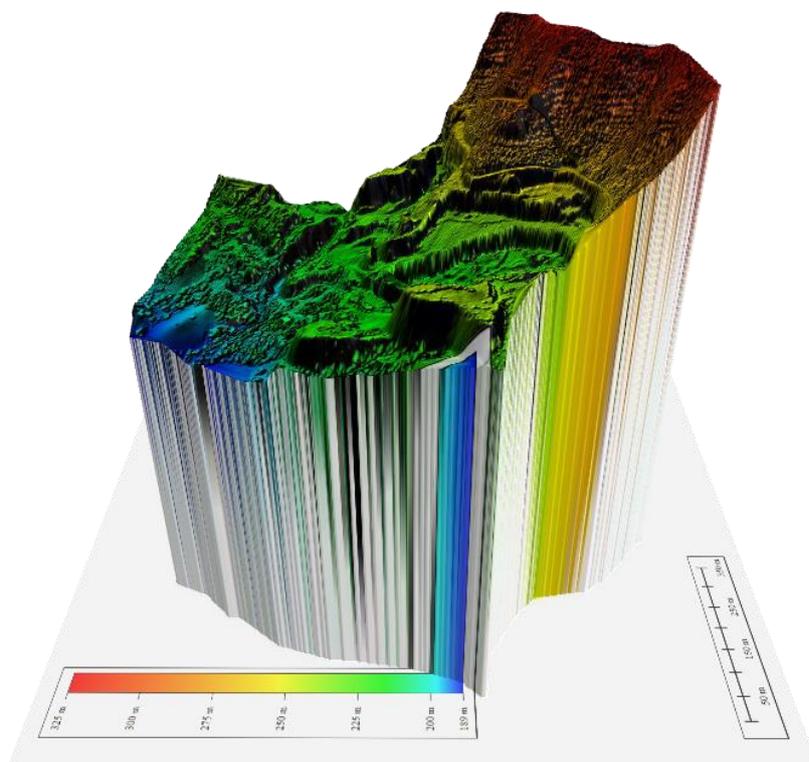


Anexo 4: MDT concesión minera “El Padró”

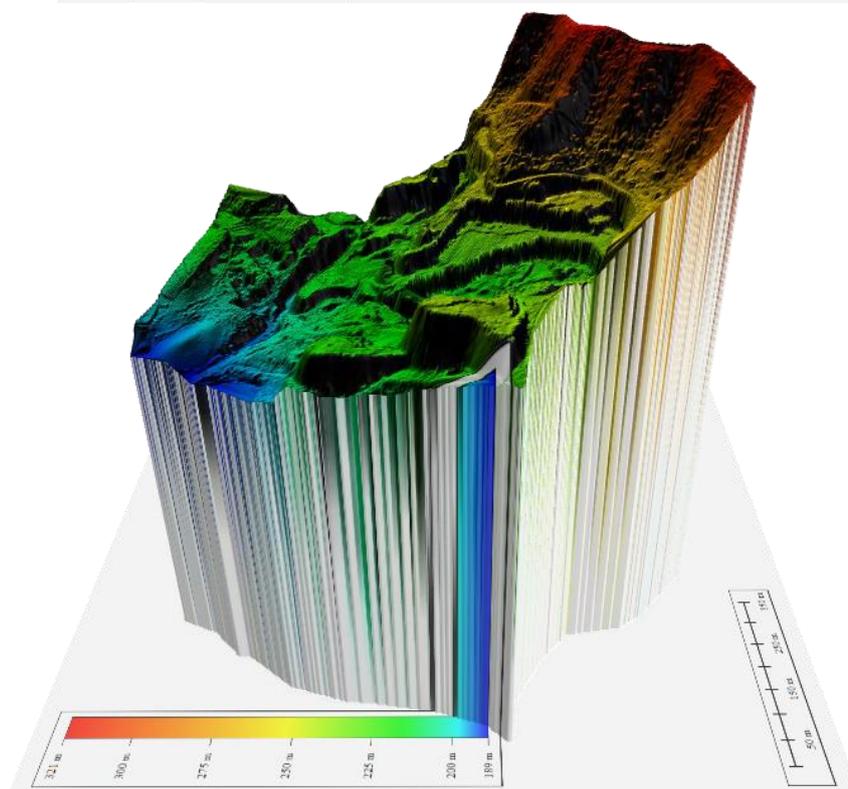


Anexo 5: Visualización 3D de (a) MDS y (b) MDT de concesión minera “El Padró”

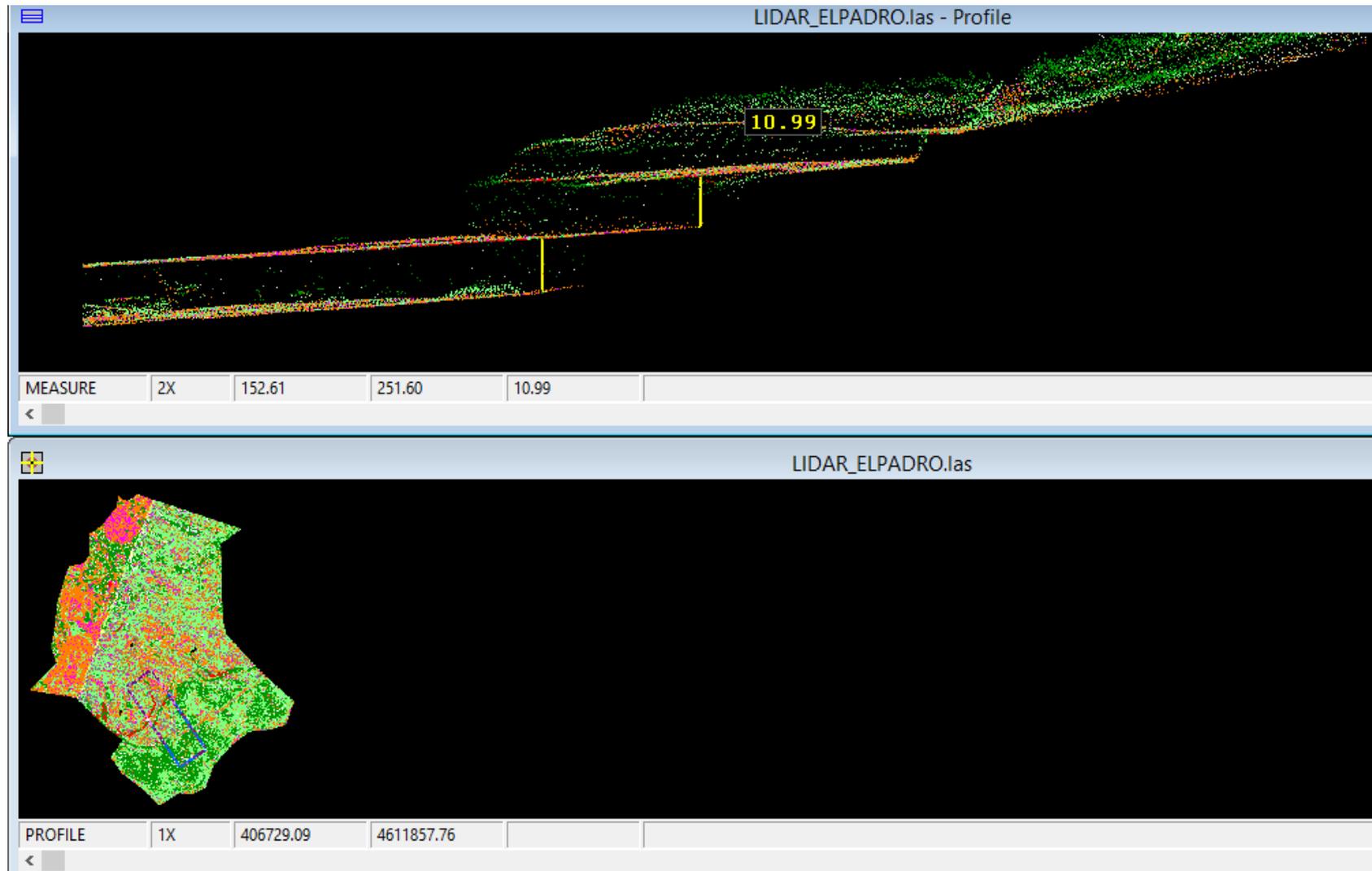
(a)



(b)



Anexo 6: Perfil de pendiente, área de explotación concesión minera “El Padró”



Anexo 8: Presupuesto levantamiento topográfico mediante tecnología UAV concesión minera "El Padró"

PROPUESTA TÉCNICA N°		DESCRIPCION DE ALCANCE TÉCNICO				
PT-470						
	NOMBRE DEL PROYECTO		LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO MEDIANTE TECNOLOGÍA UAV CONSECIÓN MINERA "EL PADRÓ" ÁREA 39.5 HECTÁREAS			
	FECHA DÍA-MES-AÑO		29/11/2016			
	TIPO DE ESTUDIO		LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO FOTOGRAMÉTRICO MEDIANTE UAV			
	LOCALIZACION DEL PROYECTO		ESPAÑA			
	CLIENTE		Ing. BLANCA MOSQUERA G.			
	DATOS DE CONTACTO		Teléfono	--	email	blankita177@yahoo.es
	NOMBRE DEL CONTACTO		Ing. BLANCA MOSQUERA G.			
	DOCUMENTOS RELACIONADOS		DS-PR-05-DOSSIER CARTOGRAFIA UAV-.pdf			
Los requerimientos, productos y entregables, así como sus unidades, cantidades y observaciones aquí expuestos, son producto del análisis y evaluación de la información física y/o digital suministrada por el cliente, y/o del consenso y debate entre este y personal encargado de GEOCAM INGENIERIA LTDA.						
ALCANCE PRODUCTOS ENTREGABLES	UNIDAD	CANTIDAD	REQUERIMIENTOS Y/O OBSERVACIONES			
AREA DEL ESTUDIO	Ha.	39.5	Cantera con un área total aproximada de 39.5 Hectáreas, localizada en la República de España. Todos los productos seran Georreferenciados al sistema Magna Sirgas Escala de precisión absoluta ofrecida en X, Y = 1:1000. En Z, el proyecto se referirá al Modelo Geoidal Local			
PUNTOS DE REFERENCIA - RED GEODÉSICA	UN	2	Se materializarán Dos (2) mojones en cilindro de concreto distribuidos en el área a levantar. Las observaciones se realizarán con equipos GNSS doble frecuencia con intervalos de tiempo suficientes para lograr la resolución de ambigüedades y precisiones centimétricas. Estos puntos serán iluminados y utilizados como puntos de fotocontrol.			
SOBRE-VUELOS UAV	GL	1	Los vuelos se realizarán con una Aeronave No Tripulada (UAV) de última generación, a una altura aproximada de 150 metros sobre el terreno. Para la realización de los vuelos se requieren condiciones meteorológicas seguras de operación.			
MODELO DIGITAL DE TERRENO MDT MODELO DIGITAL DE SUPERFICIES MDS	Ha.	39.5	Se generará un Modelo Digital de Terreno MDT y un Modelo Digital de Superficie MDS partir de procesos fotogramétricos. Se entrega en formatos compatibles con AutoCAD Civil 3d (XYZ, CSV, DXF, DWG) o cualquier otro que solicite el cliente.			
ORTOFOTOS	Ha.	39.5	Se entrega una resolución espacial 6 cm/pixel. El formato de entrega es .ECW u otro si el cliente lo requiere.			
CURVAS DE NIVEL	Ha.	39.5	Se generarán curvas con una separación de 1,0 m y/o conforme con lo requerido por el cliente. Las curvas de nivel serán polilíneas en 3D. Se entregará en formato de Autocad (.dwg) versión 2007.			
PLANOS	GI	1	Se generará un juego de planos Topográficos. El cliente debe suministrar el rótulo o formato a utilizar. Los archivos se entregarán en versión Autocad 2007. NOTA: No se incluyen impresión de Planos.			
EQUIPOS OFRECIDOS (CANTIDAD)	GL	1	Principales equipos AERONAVE NO TRIPULADA (UAV) CAMARA DIGITAL DE 12 MP EQUIPOS GNSS HEMISPHERE (4) GNSS SUBMETRICO (1)			
PRODUCTOS A ENTREGAR	GL	1	MODELO DIGITAL DE TERRENO MDT FOTOGRAMAS CRUDOS ORTOFOTOS (MOSAICOS) PLANOS TOPOGRÁFICOS REGISTROS Y SOPORTES DEL PROCESO INFORME FINAL			
PLAZO	DÍAS	12	Contados a partir del desembolso del anticipo y/o de la firma de la Orden de Servicio.			
EL PRESENTE ALCANCE NO INCLUYE	No incluye impresión de FOTO-Planos.					

PE-470		PROPUESTA ECONÓMICA			
	NOMBRE DEL PROYECTO	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO MEDIANTE TECNOLOGÍA UAV CONSECIÓN MINERA "EL PADRÓ" ÁREA 39.5 HECTÁREAS			
	FECHA DÍA-MES-AÑO	29/11/2016			
	TIPO DE ESTUDIO	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO FOTOGRAMÉTRICO MEDIANTE UAV			
	LOCALIZACION DEL PROYECTO	ESPAÑA			
	CLIENTE	Ing. BLANCA MOSQUERA G.			
	DATOS DE CONTACTO	Teléfono	--	email	blankita177@yahoo.es
	NOMBRE DEL CONTACTO	Ing. BLANCA MOSQUERA G.			
VALIDEZ DE LA OFERTA	SESENTA DIAS (60)				
<p>Los costos expuestos en la presente propuesta económica, se basan en el análisis de los requerimientos productos y entregables evaluados a partir de la información suministrada por parte del cliente, los cuales quedaron documentados específicamente en la descripción del alcance técnico N° PT-470.</p>					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO MEDIANTE TECNOLOGÍA UAV CONSECIÓN MINERA "EL PADRÓ" ÁREA 39.5 HECTÁREAS	Ha.	39.5	EUR 300.00	EUR 11,850.00
COSTO TOTAL					EUR 11,850.00
NOTAS:					
1 El valor relacionado en el cuadro NO incluye costos impositivos.					
2 La entidad contratante deberá gestionar los respectivos permisos de acceso al predio para las actividades de campo.					
FORMA DE PAGO:					
1. Valor de anticipo		40%			
2. Contra entrega de productos finales		40%			
3. A aprobación		20%			
 EDGAR ENRIQUE LEMOS WILCHES GERENTE GENERAL elemos@geocaminegneria.com			 AFILIADO CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA		