

LiDAR: introducción a la tecnología

LiDAR: introduction to technology

Nerea Zubizarreta Gisasola

REVISTA **MAPPING**
Vol. 27, 192, 56-63
noviembre-diciembre 2018
ISSN: 1131-9100

Resumen

El LiDAR es una tecnología de teledetección óptica que utiliza la luz de un láser pulsado para obtener mediciones de las coordenadas X, Y Z del terreno. Actualmente, se emplea en multitud de aplicaciones, desde el ámbito topográfico hasta aplicaciones tan novedosas como la autonomía de los vehículos de transporte. El objetivo principal de este artículo es dar a conocer la tecnología LiDAR desde sus bases teóricas hasta las aplicaciones que se llevan a cabo en los ámbitos cartográficos y forestales. Se dan a conocer una serie de pautas para tratar los datos brutos obtenidos desde un vuelo LiDAR para poder obtener mapas de alta resolución del territorio que se quiera estudiar.

Abstract

LiDAR technology is a surveying method that illuminates a target with pulsed laser light and makes an accurate digital 3D representation. LiDAR is commonly used in a wide variety of surveying applications, such as geodesy, geomatics and forestry and it is also been employed nowadays to develop the control and navigation systems of autonomous cars. Thus, the aim of this paper is to explain how LiDAR technology works and how it is employed to improve forestry and geomatic surveys, explaining how the LiDAR measurement is performed and some processing steps to obtain high-resolution LiDAR-based maps.

Palabras clave: LiDAR, mapas de alta resolución, cartografía, topografía, forestal, geoEuskadi

Keywords: LiDAR, high-resolution maps, cartography, surveying, forestry, geoEuskadi.

Ingeniera en geomática y topografía,
FUNDACIÓN HAZI FUNDAZIOA
nzubizarreta@hazi.eus

Recepción 18/10/2018
Aprobación 22/11/2018

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología "Light Detection and Ranging" o "Laser Imaging Detection and Ranging" (LiDAR) es una de las herramientas revolucionarias tanto en el área de la cartografía como en el área forestal. El LiDAR es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada (National Ocean Service, 2013). Habitualmente se emplea para la adquisición de puntos del terreno en forma de nube de puntos tridimensional, utilizándose principalmente para recoger datos de elevación precisos y productivos.

Aunque la tecnología LiDAR se emplea habitualmente en aplicaciones topográficas, ya que permite capturar una nube de puntos masiva sobre diferentes tipos de superficies terrestres (vegetación, edificaciones, suelo...) (English Heritage, 2007), tiene otra multitud de aplicaciones en campos como: geología, sismología y física de la atmósfera (Gigli & Casagli, 2013; Riquelme, Abellán, & Tomás, 2015). Entre las aplicaciones más novedosas de la tecnología LiDAR están: la conducción autónoma de los vehículos de transporte (Mahashreveta Choudhary, 2018; Rathod, 2013) donde el reto tecnológico es la adquisición y tratamiento de la nube de puntos en tiempo real, o la aplicación de la tecnología LiDAR para la realización del control de calidad en procesos de fabricación industriales como forja y fundición (Galantucci, Piperi, Lavecchia, & Zhavo, 2015) donde la incertidumbre de medida requerida se sitúa por debajo de 2 mm.

Por lo tanto, este artículo presenta la tecnología LiDAR como una herramienta novedosa en las áreas de cartografía y forestal. Entre las aportaciones más importantes del artículo están: Descripción de la tecnología y sus diferentes formas de uso, aspectos claves en la adquisición y tratamiento de las nubes de puntos y la descripción para un buen uso de la tecnología en aplicaciones cartográficas y forestales.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1. Componentes y especificaciones del LiDAR

El LiDAR aerotransportado consiste en un sensor láser instalado en una aeronave junto a un Sistema

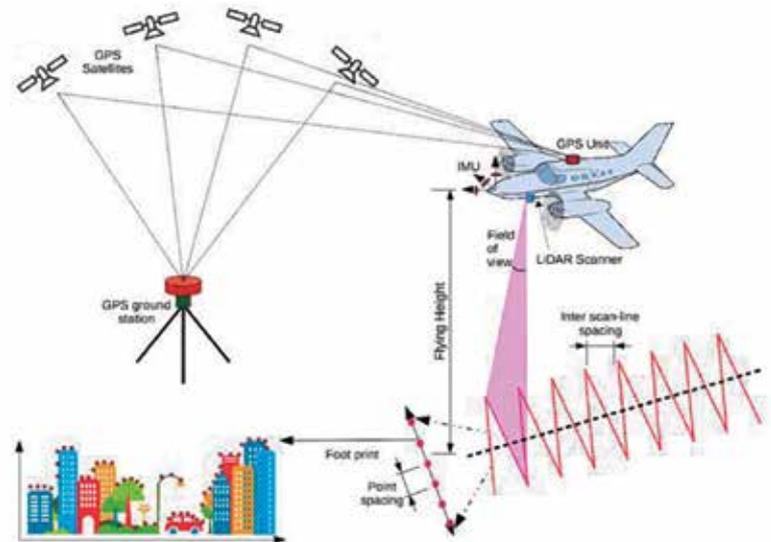


Figura 1. Componentes del LiDAR Aerotransportado (Lohani & Ghosh, 2017).

de Posicionamiento Global (GPS) (Parthasarathy & Vi, 2006), el cual posiciona de forma absoluta la tecnología LiDAR y un Sistema de Navegación Inercial (INS) (Munguía, 2014), que determina la orientación, determinando los 6 grados de libertad del LiDAR en el espacio. Como resultado, se consiguen mediciones precisas del terreno en forma de nube de puntos tridimensional.

Es interesante conocer que además de este tipo de LiDAR también existen los LiDAR tipo terrestres, los cuales pueden ser instalados en un vehículo o montados en un trípode y que actualmente están siendo aplicados para resolver la conducción autónoma de los vehículos de transporte (Rathod, 2013). Por otro lado están los LiDAR satelitales, donde el sensor está situado en satélites cubriendo grandes áreas con menor detalle (Popescu, Zhao, Neuenschwander, & Lin, 2011).

En función del tipo de trabajo que se quiera realizar y los datos que se deseen adquirir para ello, se determinan los costes y viabilidad del proyecto. Por ello, es necesario conocer las principales especificaciones de un sistema LiDAR (Lohani & Ghosh, 2017):

- Frecuencia de pulso: número de pulso por segundo. A mayor frecuencia mayor número de puntos obtenidos, hoy en día se trabaja con frecuencias superiores a 150 kHz.
- Altura y velocidad de vuelo: a mayor altura y velocidad el coste del vuelo es menor. Sin embargo, cuando la altura disminuye, el avión vuela más cerca del terreno, la precisión aumenta de manera considerable.
- Patrón de escaneo: recorrido que realiza el haz láser. Los 4 patrones principales son: lineal, zigzag, elíptico y de fibra óptica (Gatziolis & Andersen, 2008).

- Frecuencia de escaneo: número de líneas de barrido por segundo.
- Divergencia del rayo: desviación de los fotones de la línea del rayo, cuanto mayor sea la distancia mayor será el diámetro del rayo.
- Ángulo de escaneo: ángulo del pulso perpendicular a la línea de vuelo, el cual determina el campo de visión o Field of View (FOV). Cuanto menor sea el FOV más detallado será el escaneado.
- Diámetro de la huella: área de muestreo que ocupa el rayo en un plano, el cual difiere respecto a la altura del vuelo y la divergencia del rayo.
- Distancia entre huellas: distancia entre los rayos en la línea de vuelo. Distancia entre las superficies cubiertas por dos haces consecutivos.
- Longitud del pulso: duración de la emisión del pulso en nanosegundos.
- Longitud de onda: según el tipo de superficie a medir se determina el tipo de sensor con su longitud de onda correspondiente. Para medir el terreno se trabaja en el infrarrojo cercano (1040-1060nm) en cambio para batimetría además del infrarrojo cercano se trabaja en la región del verde (500-600nm).

Además, es importante considerar que los sistemas LiDAR tienen que ser calibrados de forma adecuada

para garantizar que los datos que se obtienen del sistema son precisos y repetitivos (Iordan & Popescu, 2015). Para la calibración de los sistemas LiDAR se aplican procedimientos de calibración metrológicos que consisten en medir un patrón previamente calibrado y conocido para determinar con técnicas de cálculo inversas los parámetros principales del sistema LiDAR. Esta caracterización del sistema permite calibrar el sistema LiDAR si fuese necesario (Bileschi, 2009, 2018; Pusztai, Eichhardt, & Hajder, 2018; Ye & Liu, 2017).

2.2. Datos LiDAR

Los datos obtenidos en los LiDAR aerotransportados son recogidos en nubes de puntos con coordenadas (X, Y, Z), dando la posición de cada elemento que el láser escáner ha encontrado en su camino. Las nubes de puntos obtenidas por el LiDAR son muy densas, ya que pueden llegar a contener centenas de millones de puntos en una sola adquisición. El formato de salida más extendido para el tratamiento de los datos LiDAR es el formato LAS. Este formato, se han convertido en un estándar para trabajar con este tipo de datos, ya que es un formato binario y permite el intercambio de ficheros en una nube de puntos tridimensional. (Figura 2).

Los principales atributos capturados por los sistemas LiDAR son los siguientes (American Society for

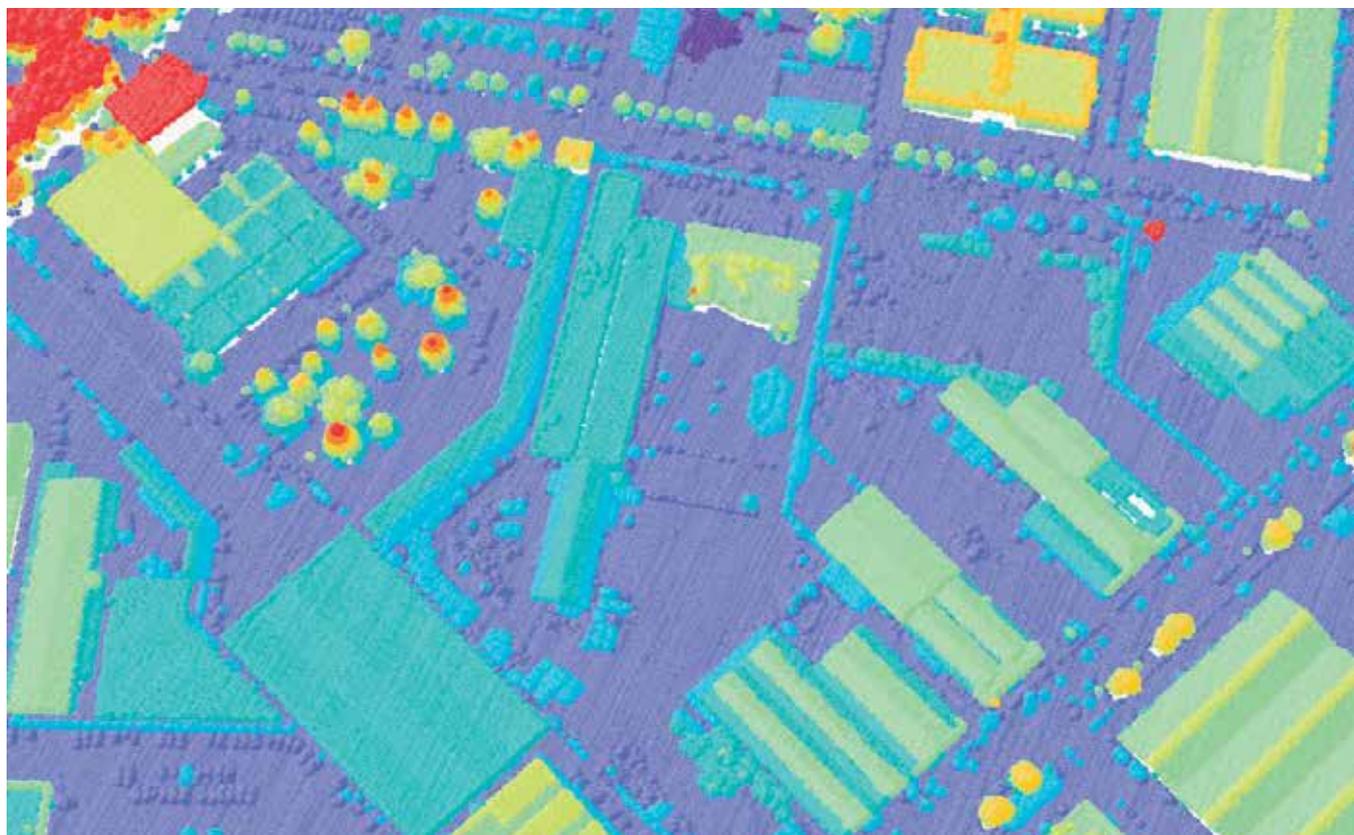


Figura 2. Nube de puntos LiDAR dibujados por altitud. (fuente: FUNDACIÓN HAZI FUNDAZIOA)

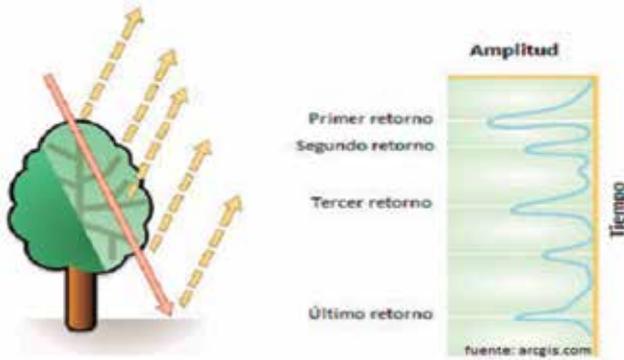


Figura 3. Ejemplo de los retornos del pulso láser en un árbol. (fuente: ArcGIS)

Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS), 2011):

- Coordenadas tridimensionales X Y Z.
- Intensidad: energía reflejada del láser en cada retorno.
- Número de retorno: Orden del retorno generado del pulso láser emitido.
- Número total de retornos: total de devoluciones de cada pulso. En zonas de vegetación alta el pulso tendrá varios rebotes hasta que llegue al suelo siendo de gran utilidad para conocer la estructura de las copas de los árboles.

En la Figura 3 se muestran los múltiples retornos del pulso láser del LiDAR desde un árbol. Estos retornos son claramente visibles tras ser filtrados por su amplitud en el tiempo, permiten detectar los diferentes tipos de superficies en un árbol (Hancock et al.,

Classification Value	Meaning
0	Created, never classified
1	Unclassified
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point ("low noise")
8	High Point (typically "high noise"). Note that this value was previously used for Model Key Points. Bit 1 of the Classification Flag must now be used to indicate Model Key Points. This allows the model key point class to be preserved.
9	Water
10	Rail
11	Road Surface
12	Bridge Deck
13	Wire - Guard
14	Wire - Conductor (Phase)
15	Transmission Tower
16	Wire-structure Connector (e.g. Insulator)
17	Reserved
18-63	Reserved
64-255	User definable - The specific use of these classes should be encoded in the Classification lookup VLR.

Tabla 1. Clasificación estándar de un fichero LAS según ASPRS (American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS), 2011).

2015).

En la tabla 1 se muestra una clasificación tipo de puntos LiDAR donde se distinguen las diferentes clases de retorno que se pueden obtener en una captura de puntos, según los esquemas de clasificación predefinidos por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) para obtener la categoría de datos deseada (American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS), 2011):

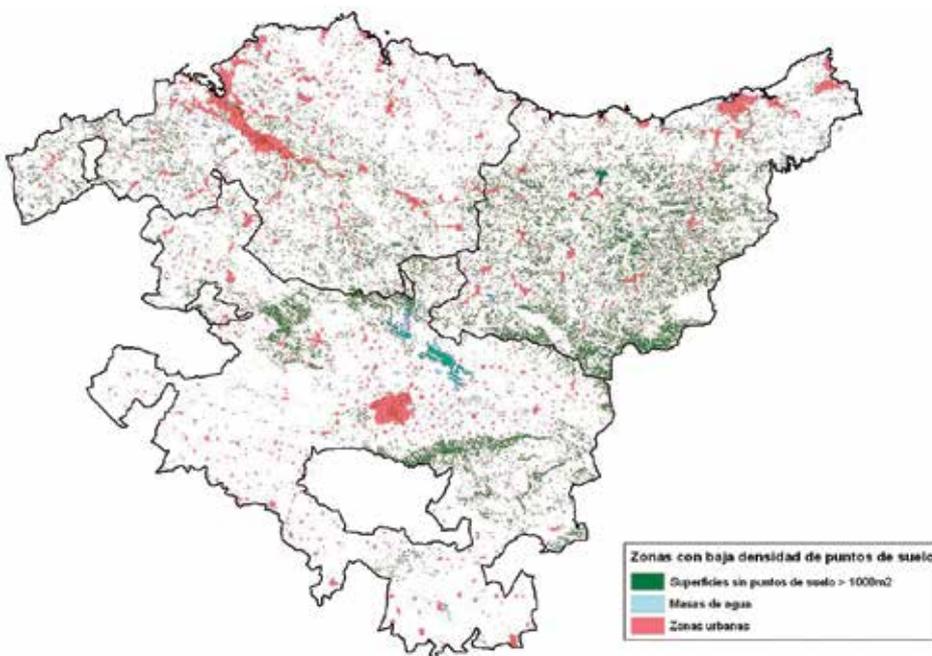


Figura 4. Control de las zonas con baja densidad de puntos clasificados como suelo. (fuente: FUNDACIÓN HAZI FUNDAZIOA)

- Puntos que son borde de pasada: los puntos que se encuentran en el borde de la línea del vuelo tienen un valor de 1 mientras que los demás tienen valor 0.
- Valores RGB: a cada punto se le atribuye la banda RGB (rojo, verde, azul) derivada de la imagen recopilada durante el vuelo.
- Tiempo GPS: fecha de emisión del pulso.
- Ángulo de escaneo: Ángulo con el que se emitió el pulso, varía entre -90, el pulso está a mano izquierda del avión, 0 debajo del avión en nadir, y +90 al lado derecho.
- Dirección de escaneo: es la dirección del espejo de escaneo.

2.3. Control calidad y mejora de los datos

Una vez obtenida la nube de puntos es necesario identificar posibles errores y para ello se llevan a cabo una serie de controles de calidad que se describen a continuación.

En primer lugar, se realiza un análisis de la documentación que se entrega junto al vuelo LiDAR con el fin de revisar la metodología llevada a cabo, medios técnicos utilizados y parámetros de precisión obtenidos. Para ello, están a disposición las especificaciones técnicas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea del Instituto Geográfico Nacional (Fomento, 2012).

Por otra parte, se realizan una serie de controles para conocer la precisión de los datos entregados. Se revisa la densidad de puntos LiDAR por m², las zonas no cubiertas por puntos, el recubrimiento entre pasadas, las diferencias de cota entre los puntos de diferentes pasadas, la clasificación automática de los ficheros LAS, puntos fugados etc. (Figura 4).

Por último, se realiza un control geométrico de la nube de puntos comparando con coordenadas de puntos de control obtenidas en campo mediante equipos que funcionan por navegación satélite, Global Navigation Satellite System (GNSS) (Wikipedia, 2018).

La precisión global horizontal nadiral después del

procesado será inferior a 30 cm RMSE_{x,y} (1 sigma) y la vertical nadiral será inferior a 20cm RMSE_z (1 sigma) (Fomento, 2012). Sólo en zonas de vegetación cerrada y pendientes acentuadas se admitirán errores de hasta 3 veces el RMSE.

La precisión general altimétrica tendrá un error medio cuadrático RMSE_z ≤0,20 m y un error máximo ≤0,40 m en el 95% de los casos. No podrá haber ningún punto con un error superior a 0,60 m.

Con el fin de mejorar la clasificación automática procedente del vuelo LiDAR, se realiza una segmentación de los archivos LiDAR en base al inventario forestal y el resultado del cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Martorell., 2018). De modo que se consigue relacionar la nube de puntos del fichero LAS con los píxeles relacionados con superficies vegetales.

3. APLICACIONES

Las aplicaciones cartográficas y forestales llevadas a cabo por Hazi Fundazioa se han realizado a partir de los Vuelos LiDAR realizados en la CAPV, los cuales están disponibles en la ftp de geoEuskadi ftp://ftp.geo.euskadi.eus/lidar (Gobierno Vasco, 2018).

	Vuelo LiDAR 2008 (Gran Bilbao, Bizkaia y Alava)	Vuelo LiDAR 2008 Gipuzkoa	Vuelo LiDAR 2012 CAPV	Vuelo LiDAR 2017 CAPV
Sensor LiDAR y equipos auxiliares				
Sensor	Lite Mapper 5600		IGI LM6800i sn 9997894	ALS70 HP SN7181
Campo de visión transversal (FOV)	60º		60º	42º
Frecuencia de escaneado	80 Hz		70 Hz	28,1 Hz (max. 52,1 Hz)
Frecuencia de pulso	120 KHz		Pulse Repetition Rate = 100 KHz	Pulse Repetition Rate=22,74 KHz
Resolución espacial. Densidad promedio	2,5 puntos por metro cuadrado		0,7 puntos por metro cuadrado	2,2 puntos por metro cuadrado
Vuelo y cobertura de puntos LiDAR				
Fechas	Gran Bilbao Bizkaia Alava 16/09/2008 08/02/2008 18/06/2008 19/09/2008 13/02/2008 10/07/2008	13/03/2008 16/10/2008	17/07/2012 28/08/2012	23/05/2017 11/10/2017
Velocidad del avión en el momento de captura de los datos LiDAR	Velocidad promedio = 110kn.		140 nudos	Velocidad mínima = 100 kn. Velocidad máxima = 150 kn. Velocidad promedio = 110 kn.
Altura de vuelo	900 m sobre el terreno Con incrementos de variación de 600 m		2400±450 m	Velocidad mínima = 700 m. Velocidad máxima = 1400 m. Velocidad promedio = 1100 m.
Precisión global horizontal nadiral después del procesado	Alava Bizkaia Emedia=0.093 m Emedia=0.093m	Emedia=0.09m	Emedia=0.07 m	Emedia=-0,129 m
Precisión general altimétrica: error medio cuadrático	RMSEZ =0.23m		RMSEZ =0.11 m	RMSEZ =0.307 m
Toma de datos GPS en vuelo				
Distancia entre receptores			40 km	80 km
Estaciones de referencia	GNSS GOBIERNO VASCO		GNSS GOBIERNO VASCO	ESTACIONES PERMANENTES DE CASTILLA Y LEON (ITACYL), ESTACIONES PERMANENTES DEL IGN Y ESTACIONES PERMANENTES FRANCIA

Tabla 2. Resumen de las especificaciones de los Vuelos LiDAR disponibles en la CAPV. (fuente: FUNDACIÓN HAZI FUNDAZIOA)

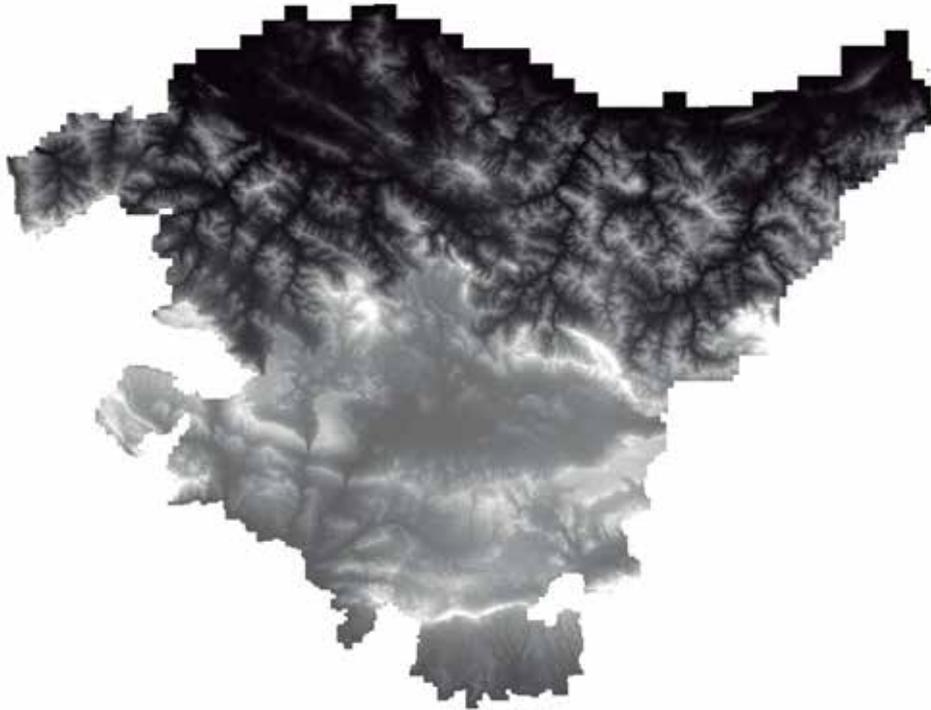


Figura 5. Modelo Digital del Terreno de la CAPV. (fuente: FUNDACIÓN HAZI FUNDAZIOA)

El primer vuelo LiDAR que se realizó en la CAPV fue en el año 2008 donde participaron la Diputación Foral de Guipúzcoa y el Gobierno Vasco. La densidad media de este vuelo es de 2 puntos/m² distribuida en hojas de 1km x 1km.

Cuatro años más tarde, en el año 2012, se realiza un segundo vuelo LiDAR para la totalidad de la Comunidad Autónoma del País Vasco. En este caso, la densidad de puntos es de 0.5puntos/m² en hojas de 2km x 2km.

El último vuelo LiDAR realizado ha sido en el año 2016, donde la densidad de puntos recogidos ha sido de 2 puntos/m² en hojas de 1km x 1km. La Tabla 2 muestra el resumen de los vuelos realizados en la CAPV desde el año 2008 (Tabla 2).

3.1. Aplicaciones topográficas

A partir de la nube de puntos clasificada obtenida del vuelo LiDAR, se generan diferentes modelos digitales de elevaciones (MDE), los cuales representan la superficie terrestre. En geoEuskadi están a disposición del usuario los siguientes modelos:

- Modelo Digital del Terreno (MDT): el Modelo Digital del Terreno de 2016 de paso de malla 1 m refleja la superficie desnuda del terreno. Incluyendo las batimetrías de los principales ríos y embalses de la CAPV, llevadas a cabo por URA (Agencia Vasca del Agua) (Figura 5).
- Modelo Digital de Superficies máximas (MDS): el

Modelo Digital de Superficies con paso de malla de 1m surge como la unión del Modelo Digital del Terreno con fecha 2012 más el Modelo Digital de elevaciones del vuelo LiDAR 2012 de la vegetación, edificaciones y construcciones tomando como criterio el valor más alto en cada metro cuadrado

- Modelo Digital de Elevaciones para Hidrología (MDEH): consiste en la unión del Modelo Digital del Terreno 2012 más el Modelo de elevaciones de los puntos procedentes del vuelo LiDAR 2012 de edificaciones y construcciones en el que se excluyen los puentes.

La denominada cartografía derivada es obtenida a partir de los modelos digitales de elevaciones mencionados en este punto. Uno de los productos más utilizado es la imagen de sombras, el cual resalta el relieve del terreno mediante la iluminación de la superficie del terreno en función de la posición y altura solar.

El mapa sombreado más actualizado de la CAPV se basa en el MDT de 1m del año 2016 calculado con los valores de 315 grados para el ángulo acimutal de la fuente de luz y de 45 grados como ángulo de altitud de la fuente de la luz sobre el horizonte.

Los mapas de pendientes y orientaciones también son derivados del MDT de 1m. El mapa de pendientes representa los diferentes grados de pendiente del territorio, el cual expresa la tasa de cambio de la elevación en cada píxel con respecto a sus píxeles vecinos. En el mapa de orientaciones cada píxel representa la dirección de la pendiente, el cual viene expresado en grados de 0° a 360° en sentido dextrógiro.

Estos mapas pueden resultar de gran utilidad para conocer donde se han realizado modificaciones artificiales de terreno como taludes, canteras o carreteras. En agricultura, son interesantes para conocer las zonas de mayor pendiente donde el riesgo de erosión es más elevado.

Otro de los productos disponibles en la web de geoEuskadi es la imagen de intensidades derivada del valor de intensidad del fichero LAS, el cual es el resultado de la reflectividad del objeto encontrado por el

pulso láser. Puede ser de gran ayuda para detección de ciertas entidades no visibles en fotografías aéreas como pistas forestales.

Otra aplicación del uso de los datos procedentes de los vuelos LiDAR es la actualización de la cartografía básica. Las curvas de nivel de la CAPV se generan directamente del MDT del 2016, donde las curvas maestras son múltiplos de 25m y las curvas de nivel tienen una equidistancia de 5m.

Las temáticas de Hidrografía y Edificación de la BTA también se han actualizado con datos procedentes del vuelo LiDAR. La Red Hidrográfica se ha generado a partir del MDEH, el cual ha sido mejorado mediante batimetría en los cauces de los ríos por la Agencia Vasca del Agua URA.

La actualización de la Edificación se ha realizado mediante la clasificación automática de las nubes de puntos del LiDAR, se obtiene los posibles nuevos edificios a restituir y los que se deberían eliminar

3.2. Aplicaciones forestales

El LiDAR es una tecnología muy valiosa para trabajos forestales gracias al múltiple retorno del haz láser. En áreas boscosas los primeros retornos se quedan en las copas de los árboles mientras que algunos de ellos llegan hasta el suelo.

Permite realizar inventarios forestales con menor coste económico y temporal. Se estudia toda la superficie al completo en comparación con los muestreos realizados en trabajos de campo y es posible obtener información de áreas de difícil acceso.

La información obtenida de la tecnología LiDAR se combina con las bandas multiespectrales de las imágenes áreas (RGB e IR) consiguiendo datos muy valiosos para diferentes aplicaciones forestales.

Diversos proyectos acometidos por HAZI Fundazioa en los últimos años han permitido obtener algoritmos de cálculo y aplicarlos a cuadrículas de 1 hectárea de superficie, con el fin de estimar la evolución de estos parámetros en el tiempo y en el espacio.

En el proyecto «FORRISK: riesgos naturales en las masas forestales atlánticas» se realizan cálculos de alturas y diámetros de arbolado con los datos LiDAR para conocer posibles riesgos forestales por incendios forestales o por viento/nieve (Garapen & Saila, 2014).

En el Plan Estratégico de la industria de la madera en Euskadi 2015 se llevan a cabo diferentes cálculos con ficheros LAS para conocer la productividad forestal. La altura dominante es el resultado de los valores de la altura media de los 100 árboles más altos por hectárea. Con este dato se obtienen las edades aparentes, las cuales se calculan mediante el ritmo de

crecimiento entre las alturas dominantes derivadas del LiDAR 2008 y LiDAR 2012 (Departamento de Educación UPS, 2017).

3. CONCLUSIONES

La tecnología LiDAR es una de las herramientas revolucionarias en el mundo de la cartografía gracias a su rapidez, exactitud y cantidad elevada de datos. Los modelos digitales de elevaciones resultan muy sencillos de generar con los software comerciales que existen hoy en día, como LAStools, ArcGis de ESRI o el software comercial QGIS.

Sin embargo, el mayor inconveniente de esta tecnología es la clasificación de los puntos del fichero LAS. Sin una buena clasificación de estos archivos, los MDE pueden resultar erróneos en algunas zonas del territorio. En este artículo se han dado a conocer dos técnicas para segmentar dichos ficheros LAS, aunque el futuro de la tecnología LiDAR debe estar en mejorar la clasificación de los archivos.

El uso de la tecnología LiDAR en el ámbito forestal ha dado grandes resultados gracias al múltiple rebote del haz láser y a la obtención de datos en zonas de difícil acceso. Se han conseguido mapas con variables forestales para el total del territorio de la Comunidad Autónoma Vasca.

AGRADECIMIENTOS

El presente artículo divulgativo se ha realizado gracias a la colaboración del área de GIS y Forestal de HAZI Fundazioa con el Servicio de Cartografía del Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda.

REFERENCIAS

- American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS). LAS SPECIFICATION Version 1.4 - R6 (2011).
- Bileschi, S. (2009). Fully automatic calibration of LiDAR and video streams from a vehicle. *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops 2009*, 1457–1464. <https://doi.org/10.1109/ICCVW.2009.5457439>
- Bileschi, S. (2018). Fully automatic calibration of LiDAR and video streams from a vehicle The MIT Faculty has made this article openly available . Please

- share Bileschi, S. "Fully automatic calibration of LiDAR and video Publisher Version Accessed Citable Link Terms of Us.
- Departamento de Educación UPS. (2017). Plan Estratégico, 33. <https://doi.org/citeulike-article-id:590637>
- English Heritage. (2007). Sustaining the historic environment: new perspectives on the future: an English heritage discussion document, 11. Retrieved from <http://books.google.com.tr/books?id=c58WOwAACAAJ>
- Fomento, M. de. Sistema de aseguramiento de la calidad de vuelo LiDAR en el marco del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) (2012).
- Galantucci, L. M., Piperi, E., Lavecchia, F., & Zhavo, A. (2015). Semi-automatic low cost 3D Laser scanning systems for reverse engineering. *Procedia CIRP*, 28, 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.016>
- Garapen, E., & Saila, E. T. A. L. (2014). Proyecto forrisk.
- Gatzolis, D., & Andersen, H.-E. (2008). A guide to LiDAR data acquisition and processing for the forests of the Pacific Northwest., (July). <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-768>
- Gigli, G., & Casagli, N. (2013). Extraction of rock mass structural data from high resolution laser scanning products. *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling*, 3(2), 89–94. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31310-3_13
- Gobierno Vasco. (2018). GEOEUSKADI FTP. Retrieved from <http://www.geo.euskadi.eus/s69-15375/es/>
- Hancock, S., Armston, J., Li, Z., Gaulton, R., Lewis, P., Disney, M., ... Gaston, K. J. (2015). Waveform LiDAR over vegetation: An evaluation of inversion methods for estimating return energy. *Remote Sensing of Environment*, 164, 208–224. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.013>
- Iordan, D., & Popescu, G. (2015). THE ACCURACY OF LiDAR MEASUREMENTS FOR THE DIFFERENT LAND COVER CATEGORIES. *Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*, IV(February 2017), 158–164. Retrieved from <http://landreclamationjournal.usamv.ro/pdf/2015/vol.IV/vol2015.pdf#page=166>
- Lohani, B., & Ghosh, S. (2017). Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section A - Physical Sciences*, 87(4), 567–579. <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0435-9>
- Mahashreveta Choudhary. (2018). What is the role of LiDAR in autonomous vehicle? Retrieved from <https://www.geospatialworld.net/blogs/what-is-the-role-of-lidar-in-autonomous-vehicle/>
- Martorell, A. (2018). El NDVI o Índice de vegetación de diferencia normalizada. Retrieved from <https://geoinnova.org/blog-territorio/ndvi-indice-vegetacion/>
- Munguía, R. (2014). A GPS-aided inertial navigation system in direct configuration. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(4), 803–814. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)70096-3](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)70096-3)
- National Ocean Service. (2013). LiDAR—Light Detection and Ranging. Retrieved from <https://www.webcitation.org/6H82i1Gfx?url=http://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>
- Parthasarathy, J., & Vi, C. (2006). POSITIONING AND NAVIGATION SYSTEM USING GPS Parthasarathy. *Jagannathan@sun.com*, XXXVI, 208–212.
- Popescu, S. C., Zhao, K., Neuenschwander, A., & Lin, C. (2011). Satellite LiDAR vs. small footprint airborne LiDAR: Comparing the accuracy of aboveground biomass estimates and forest structure metrics at footprint level. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 2786–2797. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.026>
- Pusztai, Z., Eichhardt, I., & Hajder, L. (2018). Accurate calibration of multi-lidar-multi-camera systems. *Sensors (Switzerland)*, 18(7), 1–22. <https://doi.org/10.3390/s18072139>
- Rathod, S. D. (2013). An autonomous driverless car: an idea to overcome the urban road challenges. *Journal of Information Engineering and Applications*, 3(13), 34–38.
- Riquelme, A. J., Abellán, A., & Tomás, R. (2015). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 195, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009>
- Wikipedia. (2018). Satellite navigation. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation
- Ye, H., & Liu, M. (2017). LiDAR and Inertial Fusion for Pose Estimation by Non-linear Optimization. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1710.07104>

Sobre la autora

Nerea Zubizarreta Guisasola

Técnico analista en Sistemas de Información Geográfica en la empresa Fundación HAZI Fundazioa. Graduada en Ingeniería Geomática y Topografía por la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea.