

## ***EL PNOA-LIDAR-CYL-2010: CONDICIONANTES TÉCNICOS DE SU ELABORACIÓN, LIMITACIONES Y POTENCIALIDADES PARA SU APROVECHAMIENTO***

Óscar Odón RODRÍGUEZ RICO ([oscarodonr@gmail.com](mailto:oscarodonr@gmail.com))

Recibido: 21/06/2015

Aceptado: 03/09/2015

**RESUMEN:** El Instituto Geográfico Nacional, realizó un vuelo LIDAR de gran parte de España en el año 2010 dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Numerosos profesionales del sector demandaron un acceso libre a estos datos, pero hasta el año 2015 esto no fue posible. Durante este tiempo se especuló con las posibilidades de mejora de diversos productos y procesos cartográficos apoyados en el uso de esta información; sin embargo, se ha visto que este producto puede no cumplir con las expectativas. No obstante, también hay un número no pequeño de usuarios satisfechos con los subproductos que se obtienen a partir de los datos LIDAR. Así pues, se hace necesario realizar un análisis para responder a los siguientes interrogantes: ¿Para qué sirve este conjunto de datos LIDAR? ¿Qué podemos esperar de él? ¿Es válido para análisis forestales, hidrológicos, agronómicos, etc.? ¿Dónde puede ser más útil? ¿Dónde no ofrece ningún valor añadido a los productos ya existentes?

En definitiva, este artículo pretende aportar algunas ideas que permitan orientar al usuario en la explotación de este conjunto de datos LIDAR.

**PALABRAS CLAVE:** LIDAR-2010, PNOA, IGN, control del Calidad LIDAR, aplicaciones LIDAR.

### ***PNOA-LIDAR-CYL-2010: TECHNICAL CONSTRAINTS OF PROCESSING, LIMITATIONS AND POTENTIAL FOR USABILITY***

**ABSTRACT:** The National Geographic Institute of Spain did a LIDAR flight of Spain in 2010 within the National Plan of Aerial Orthophotography. Many professionals demanded free access to this data, but by 2014 this was not possible. During this time there were speculations about the possibilities for improvement various cartographic products and processes supported by the use of this information; however after its release it has been seen that this product may not meet expectations. On the other hand there are also some satisfied users with the products obtained from the LIDAR data. Thus, it is necessary to conduct an analysis to answer the following questions: What is this set of LIDAR data for? What can we expect from it? Is it valid for forest, hydrological, agronomic analysis, etc.? Where can it be more useful? Where does it not offer any added value to existing products?

In short, this article seeks to contribute some ideas to guide the user in the use of this set of LIDAR data.

**KEY WORDS:** LIDAR-2010, PNOA, IGN, LIDAR, quality control LIDAR, LIDAR applications.

## I. METODOLOGÍA

En el LIDAR<sup>1</sup> y en la fotogrametría lo más importante, su esencia, recae tanto en un proceder de buenas prácticas en la captura de información inicial como en seguir un riguroso tratamiento de esta hasta su explotación y publicación. Así pues, para responder a los interrogantes mencionados en el resumen, debemos revisar algunas de las características técnicas y teóricas que enmarcan la captura y tratamiento de estos datos LIDAR, para que, una vez establecidas las premisas de calidad, se pueda establecer cuáles son las líneas rojas que enmarcan su utilidad. Y así definidas las limitaciones que este producto tiene, se propondrá que características deberían tener futuros LIDAR-PNOA.

En definitiva, en estos primeros apartados se va a abordar un análisis de las características fundamentales que definen el estado de este producto, que son: la densidad de malla, la calidad geométrica y la veracidad de su clasificación. Posteriormente se abordará el análisis del control de calidad realizado a este producto por el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL). Para terminar con una serie de conclusiones que pretenden responder a los interrogantes planteados.

## II. MARCO DE TRABAJO

El LIDAR al que se refiere este artículo se enmarca dentro del PNOA<sup>2</sup> y el ámbito geográfico sobre el que vamos a centrar nuestro análisis es la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Por lo que el nombre completo del producto a analizar sería PNOA-LIDAR-CyL-2010, que a partir de ahora llamaremos LIDAR-10.

Los sensores que se utilizaron para la captura de esta información fueron el Leica ALS50 serial SN048, el serial SN73 y el Leica ALS60 serial SN084, ambos propiedad de la empresa Azimut S.A.

### II.1. La densidad media o espaciado de malla

El LIDAR no es un concepto novedoso, ya que proviene del radar (1935); en esencia consiste en una técnica de envío de una señal luminosa y el posterior registro del rebote de la misma. Aunque el desarrollo del LASER se produjo en los años 1950/1960, la incorporación del LIDAR a la cartografía no fue posible hasta finales de la década de 1990, cuando el desarrollo tecnológico permitió disminuir los tiempos de procesado y registro de dicha señal,

---

<sup>1</sup> LIDAR, acrónimo de Light Detection and Ranging.

<sup>2</sup> PNOA, acrónimo de Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.

haciéndose así viable el escaneo de grandes superficies a la velocidad de un avión. Por ello, el desarrollo tecnológico de la electrónica es la primera condición para obtener un LIDAR de alta densidad.

LIDAR-10, según el informe de control de calidad realizado por las empresas de vuelo, tiene una densidad media real de 0,54 puntos/m<sup>2</sup>; a ella contribuyen tres condicionantes físico-tecnológicos y uno económico, que se detallan a continuación.

### *II.1.a. La velocidad de vuelo*

Considerando que este tipo de sensor actúa como un escáner que va barrriendo el suelo capturándolo punto a punto, es obvio que cuanto menor sea la velocidad de vuelo mayor será la densidad de puntos capturados. Así pues, las características técnicas del avión son limitantes para la densidad.

**Tabla 1.** Características del LIDAR-10

<i>Descripción</i>	<i>Valores</i>
Altura de vuelo sin terreno	2600 – 3070 m.
Velocidad del avión	150 Knt.
FOV Pts./ m <sup>2</sup>	38° 48° y 50°
Frecuencia usada	89,9 a 91,8 MHz.
Ecos	4 ecos
Anchura de la línea en terreno	2.850 m.
Solape entre pasadas	25 %
Máx. separación transversal entre puntos	2.33 m.
Máx. separación longitudinal entre puntos	2.32m.
Promedio de densidad de puntos	0.54 ts./m <sup>2</sup>
Promedio de separación entre puntos	1.36 m.
Densidad de puntos en el Nadir	0,37 Pts./ m <sup>2</sup> .

FUENTE: Elaboración del autor

La velocidad mínima de vuelo para aviones tipo Cessna turbohélice, según Aghios (2006), que son los que suelen tener las empresas de vuelo, oscila entre los 100-120 knt (nudos) con vientos en calma, la cual deberá ser incrementada en tantos nudos como tenga la velocidad del viento en contra. Por lo tanto, lo habitual será volar a 150 knt (77 m/s o 277 km/h). En otros términos, considerando que el ancho de barrido es de 2.850 m, el sensor utilizado para este vuelo LIDAR, debería ser capaz de emitir y registrar un mínimo de 438.900 puntos por segundo sin contar los distintos ecos.

En definitiva, la velocidad del avión y el tiempo necesario para el procesamiento de la información capturada han sido históricamente los principales escollos para el desarrollo de este sensor.

### *II.1.b. La altura de vuelo*

Cuanto mayor sea la distancia entre avión y suelo, mayor será el tiempo que tarda la señal en hacer el recorrido de ida y vuelta; este hecho, sumado a la velocidad del avión, determina la cantidad de puntos que se pueden capturar (SITHOLE, 2006).

Cierto es que los equipos emiten multipulsos; de lo contrario sería imposible la captura de los millones de puntos, pero en cualquier caso el tiempo total que se invierte para cada señal es un elemento limitante para la densidad de la malla; por ejemplo para una altura de 1.000 m se necesitan 6,67  $\mu$ s.

### *II.1.c. El ancho de barrido*

Este sensor al actuar como un escáner, va recorriendo el suelo en forma de barrido (según los distintos tipos de sensores puede ser en forma de zig-zag, circular, lineal,...). Esto implica que cuanto mayor sea el ancho de barrido, mayor será la eficiencia productiva, pero la densidad será menor. Por otro lado, el ancho de barrido o escaneo también determina la precisión del LIDAR. Por ello para poder asegurar que, en los criterios de planificación del vuelo LIDAR, puedan cumplir con las precisiones que establece el pliego de prescripciones técnicas del IGN (2010), que son de 20 cm de EMC (error medio cuadrático) en altimetría y 15 cm en planimetría, se debería utilizar un FOV (field of view) (ángulo de escaneo) inferior a los 50°.

En consecuencia, como los sensores utilizados en este proyecto necesitan utilizar un ancho de barrido tan pequeño (FOV menores de 50°) y además se realizó un vuelo tan alto, para poder cumplir con las especificaciones PNOA-Orto (originalmente la captura estaba planificada mediante la combinación de sensores<sup>3</sup> cámara-lidar...), el producto resultante que se obtuvo tuvo una eficiencia productiva muy alta pero a la vez una densidad de la malla y una precisión realmente bajas.

### *II.1.d. El condicionante económico. La combinación de sensores*

Este condicionante estriba en que la captura de datos debería ejecutarse desde un vuelo combinado PNOA-Ortofotografía y PNOA-LIDAR. Originalmente se planificó embarcar cámara y LIDAR en la misma aeronave, para así

---

<sup>3</sup> La precisión esperada es la que el pliego de prescripciones técnicas para vuelo PNOA combinado establece; este es un documento elaborado por el IGN, que es la base técnica para la obtención del producto final que entregan las empresas de vuelo adjudicatarias del vuelo al IGN

poder ahorrar el coste del vuelo LIDAR. Esta razón explica por qué se vinculaban las características del LIDAR a las del vuelo PNOA tanto en tiempo como en forma.

Cumplir con las especificaciones PNOA-Ortofotografía era una condición innegociable, ya que el FEGA (Fondo Español de Garantía Agraria), que al fin y al cabo es el organismo que financia la producción de la Ortofotografía PNOA, no sólo no tenía necesidad alguna de financiar el LIDAR, sino que para el FEGA priorizar la captura del LIDAR suponría un retraso en la captura de la foto, lo que implicaría no poder obtener todas las fotos durante el periodo libre de nubosidad. En este mismo sentido, pero de forma muy distinta, no había ningún socio o institución dentro del PLAN PNOA capaz de afrontar económicamente un LIDAR independiente.

Como la simultaneidad se mostró un tanto incompatible, ya que suponía no poder obtener la ortofotografía dentro del periodo establecido, el verano de 2010. En muchos de los casos se optó por priorizar la captura de fotos, frente al LIDAR, lo que obligó a ejecutar los vuelos por separado. En definitiva, ese ahorro en algunos casos no se pudo lograr.

En consecuencia, planificar en el año 2009 la ejecución específica de un vuelo LIDAR, para ejecutarlo en el 2010, para todo el territorio nacional, en plena crisis económica, probablemente no hubiera sido posible por falta de fondos y/o por prioridades de gasto público. Por ello, ese planteamiento inicial de hacer vuelo combinado, quizás haya sido determinante para que hoy podamos contar con la primera colección LIDAR-PNOA de casi todo el territorio nacional.

## II.2. La calidad geométrica de los puntos

Al igual que en la característica anterior, para asegurar una buena calidad métrica se necesita contemplar varios condicionantes: que la señal recibida por el sensor llegue en perfectas condiciones de potencia e intensidad, que el proceso de ajuste de pasadas se haga acorde con las especificaciones técnicas establecidas por el fabricante del sensor y que los campos de calibración se hayan calculado asegurando el mayor rigor y exactitud posibles.

**Tabla 2.** *Precisiones estimadas por planificación de vuelo*

<i>Descripción</i>	<i>Valores (m.)</i>
Transversal.	0.27 - 0.34
Longitudinal.	0.26 - 0.32
Altimétrica.	0.12 - 0.18

FUENTE: Elaboración del autor

En la TABLA 2 se muestra la precisión media planificada; nos referiremos a ella en otro apartado más adelante. En la TABLA 3 se muestran los valores de precisión, que se obtienen tras el ajuste por pasadas, y son los que aparecen en los informes de metadatos que aporta la empresa de vuelo (Azimut S.A. 2010).

**Tabla 3.** *Precisiones globales después del procesado*

Horizontal nadiral	Mínima= -0.0686 Medía= +0.159 Máxima= +0.058
Altimétrica. EMC	0.70

FUENTE: Elaboración del autor

### *II.2.a. La calidad de la señal recibida*

El LIDAR pertenece a la tipología de sensores activos, es decir, la captura de información comienza con la emisión de un impulso luminoso coherente que, una vez que choca contra una superficie, rebota. Este impulso rebotado será capturado por el sensor, cerrándose así el ciclo de captura.

La luz incidente es coherente; sin embargo la rebotada ya no lo es. Es decir, el rebote será un haz que se difracta en todas las direcciones del espacio. Por consiguiente, de toda la señal emitida, solamente una pequeña parte será recibida.

La generación de un impulso LASER es la creación de un haz de luz coherente en dirección y amplitud mediante un efecto de la mecánica cuántica (MAIMAN, 1960). Esa generación requiere de una pequeña fracción de tiempo, el cual consideramos como tiempo necesario para «cargar un disparo LASER o LIDAR». Durante ese tiempo se ejecuta un proceso interno que consiste en aumentar la potencia del impulso luminoso normal, a partir de la energía que se libera cuando los electrones de los gases, que hay en la cavidad de generación laser, saltan a orbitas más pequeñas liberando energía. Energía que será recogida por el haz de luz original, estimulándose para así aumentar su coherencia y su potencia... Dicho en otras palabras, cuanto mayor sea la potencia de emisión necesaria, más tiempo se necesita para estimular un haz luminoso, por lo que a mayor potencia necesaria menor es la frecuencia de pulsos.

De igual modo, hemos de considerar los aspectos mecánicos del LIDAR, tales como la velocidad de oscilación y el tamaño del espejo rotor, aspectos que son determinantes tanto en la frecuencia como en la calidad de la señal a capturar.

En definitiva, la calidad de la señal recibida va a depender de la potencia de emisión, de la frecuencia de escaneo y de todos aquellos aspectos mecánicos inherentes al propio sensor.

La frecuencia de sensores utilizados en la captura del LIDAR 2010 que especifican tanto los propios fabricantes de los aparatos (Leica, Reigl, etc.), como estudios independientes (AGHIOS, 2006), afirman que para campos de visión (FOV) entre 0° a 10° la frecuencia se mantiene estable en su máximo 90 MHz. A partir de los 10° la frecuencia se reduce exponencialmente, llegando hasta los 40 MHz con 50° de FOV. Esto explica que con los sensores utilizados en el año 2010 (no evidentemente con los actuales), se obtenían valores muy bajos de frecuencia y, en consecuencia, de densidad.

En definitiva, cuando se busca la máxima eficiencia productiva mediante vuelos altos con amplios campos de visión, se hace necesario ser más tolerante en la precisión y densidad, ya que ambas disminuyen considerablemente a consecuencia de la debilidad de la señal recibida y por la baja frecuencia de emisión, tal y como ha sido el caso del LIDAR-10.

### *II.2.b. Procesos de ajuste geométrico entre pasadas*

Al igual que se hace en fotogrametría, una vez obtenidos los datos de vuelo, se requiere la realización de un procesado que sea capaz de integrar todos los valores de los distintos sensores embarcados: receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) sistema de mediciones inerciales, las oscilaciones de la plataforma giroestabilizadora y los eventos de disparo de la cámara. En el caso del LIDAR, de igual forma, hay que aplicar el filtro Kalman para integrar los valores de todos los sensores embarcados: receptor GNSS, sistema inercial y *eventos virtuales*; en definitiva, mediante esa integración se pretende realizar un proceso de calibración entre los distintos sensores para eliminar todas las fuentes de error, especialmente los errores sistemáticos en los datos LIDAR capturados (HABIB y VANS, 2009).

La integración se hace en torno a *eventos virtuales* concretos, la cual es una de un conjunto de soluciones de actitud y posición para cada conjunto de puntos capturados en el mismo instante. Esta integración debe contemplar que hay diferencias en la frecuencia de los distintos sensores: 2 Hz para el GNSS, 256 Hz. para el IMU y 90 MHz. para el LIDAR. En definitiva, se trata de asegurar una correcta integración de datos, para obtener una métrica lo más precisa posible. Cada grupo de soluciones sólo es válida para un pequeñísimo conjunto de datos capturados (puntos) en ese mismo instante, y así sucesivamente se irán agrupando cada conjunto de puntos a su evento virtual correspondiente, como si de un disparo de cámara se tratase. Además de considerar la anterior variabilidad, se debe disponer de una correcta calibración de todos los dispositivos embarcados, es decir, los vectores y ángulos de des-alineamiento entre los distintos sensores embarcados deben de estar correctamente calculados,

para poder realizar los cálculos y ajustes libres de errores sistemáticos (KATZENBEISSER, 2003).

Por otro lado y considerando lo que apuntaban SMITH Y PINKER (SMITH y PINKER, 2000), que la precisión geométrica de los productos de cartografía que se obtenía a partir de vuelos combinados dependía de la calidad y del rigor de las mediciones GNSS e INS, por ello y considerando también las limitaciones de los sensores LIDAR que las propias casas comercializadoras apuntan, se hace necesario que la distancia entre el GNSS móvil y el GNSS base, sea menor de 40 km. Con ello aseguramos que las condiciones atmosféricas sean lo más parecidas posible entre ambos receptores.

En definitiva, una vez calculados todos los parámetros antes mencionados, con el mayor rigor posible, se pueden procesar los datos brutos de vuelo para obtener así una primera colección de puntos capturados. Estos datos, antes de ser explotados, deben ser ajustados en dos sentidos: primero se realizará un ajuste por pasadas para eliminar el sesgo de error que se puede obtener de la deriva del sistema inercial y del avión y, segundo, otro ajuste para eliminar la desviación en altimetría derivada de los posibles errores de cálculo en los vectores (*level-arm*) entre todos los sensores embarcados.

- ✓ El primer ajuste, el procesado por pasadas en planimetría, consiste en una comparación de planos a partir del modelado de los propios puntos, entre las distintas pasadas, con el objetivo de compensar las desviaciones que se producen a consecuencia de la deriva del sistema de mediciones inerciales.
- ✓ Para el segundo, ajuste por pasadas en altimetría, se precisa de campos o lineales de calibración, a partir de los cuales se establecen planos 3D, que posteriormente serán comparados con los planos 3D que presenta el LIDAR. Tras esa comparativa de ambos planos se puede calcular el valor de desplazamiento entre ambos.

Así, una vez calculados los vectores de desplazamiento entre las distintas pasadas en las tres componentes, se aplicarán esos valores a todos los puntos, con el objetivo de eliminar los errores producidos por todos los sesgos (KORNUS y RUIZ, 2003).

En consecuencia, el LIDAR, en virtud de sí mismo, presenta una precisión en planimetría más débil que en altimetría, debido a que un LIDAR no es otra cosa que un distanciómetro; medir distancia con impulsos luminosos es muy exacto, sin embargo, ubicar correctamente esos puntos en el espacio es un poco más complicado. Se requiere de una gestión correctamente todos los cálculos y procesados antes mencionados, de una adecuada georreferenciación



de *datum* y proyección, y de un procedimiento de buenas prácticas para la ejecución del vuelo.

En definitiva las fuentes de error y sus defectos en el producto LIDAR, se pueden solventar considerando no sólo todos los conceptos antes mencionados sino también corrigiendo aquellas desviaciones que se producen por aspectos tales como: la dirección y deflexión del rayo, la actitud del propio sensor en cada instante, las interrupciones en las señales GNSS, el cambio de las condiciones troposféricas, el multicamino,... (KORNUS y RUIZ, 2003). Son aspectos que no se desarrollarán en este artículo, pero es necesario mencionar, ya que también son el origen de algunas fuentes de errores aunque menos importantes que las anteriores.

### **III. CALIDAD DEL LIDAR-2010**

La calidad de la información geográfica LIDAR se logra siempre que la captura y los procesos de ajuste se realicen considerando todos los aspectos antes mencionados. No obstante, y para poder corroborar que el producto final se ajusta a los criterios con los que fue planificado, se hace imprescindible realizar un control de calidad tanto al producto final como al método de procesado. A este respecto hay gran cantidad de literatura y normas; en especial cabe destacar la norma ISO 19113 que establece las condiciones para determinar la calidad de las bases de datos geográficos, la cual establece que la calidad depende tanto de la características cuantitativas y cualitativas como de la propia información geográfica. Concretamente, para la parte cuantitativa establece como criterios básicos: la completión, la consistencia lógica en atributos relaciones y formato, la exactitud temporal, la exactitud temática y la exactitud posicional. Por consiguiente, en los apartados posteriores se van a relacionar algunos de los controles que establece la norma, para poder determinar el estado del LIDAR 2010 y, por ende, determinar su utilidad.

Considerando no sólo toda la experiencia que se tiene desde el ITACYL en la realización de controles de la calidad de los productos cartográficos, sino también la norma ISO 19138, y la propuesta de RUANO (2008) que establece el E.M.C. (error medio cuadrático) como una media muy acertada para cuantificar la calidad. Utilizaré este parámetro, el EMC, en los controles a realizar, junto al coeficiente de confianza posicional al 95% de RUANO (2008), para así poder concluir con un criterio objetivo al grado de calidad de este LIDAR-10.

### III.1. La exactitud temática o calidad en la clasificación de los puntos

Con los datos LIDAR, una vez completada la fase de ajuste geométrico, se realiza una clasificación automática de la información para organizarla en clases de suelo, edificaciones, vegetación, solape,...

Inicialmente se hace necesario señalar ¿qué es y qué hace la clasificación automática? Es un conjunto de procesos que utiliza distintos algoritmos para añadir a toda la información previa que ya tiene cada punto un metadato temático, el cual hace referencia al elemento geográfico sobre el que se sitúa dicho punto. En consecuencia, clasificar es ejecutar diferentes algoritmos para determinar ese metadato temático.

Uno de los algoritmo más utilizados para clasificar suelo desnudo es «el del umbral de elevación con ventana expandida» (ZANG y WHITMAN, 2005), es un proceso iterativo de máscara o ventanas cada vez más grandes donde se van eliminando los puntos cuya cota sobresalga por encima o por abajo de la cota media de puntos dentro de la ventana. Seguidamente se utilizarán otros algoritmos como los de progresión morfológica, los cuales mediante la detección de formas en el suelo no desnudo permiten diferenciar árboles, edificios y vegetación baja (ZHANG *et al.* 2003). Otro de los algoritmos muy utilizados es el de pendiente máxima, el cual permite diferenciar tejados de árboles; este se realiza a partir de la diferencia de variación de pendiente que se da, bien entre puntos alineados y consecutivos de un tejado, o bien en la nube de puntos de cota variable sobre la copa de los árboles. A los algoritmos anteriores se suele añadir un ajuste final iterativo polinómico, con el que se logran ajustar los resultados obtenidos para reducir errores en la clasificación.

En definitiva, los procesos de clasificación se realizan en dos fases, una primera a partir del análisis geométrico de la información, mediante la definición de planos y pendientes; una segunda, mediante la consideración del resto de metadatos de los puntos tales como el número de eco, la intensidad y el color,... en consecuencia, utilizando la propia información de cada punto y con una correcta parametrización que permita discriminar correctamente los puntos, se puede lograr una clasificación aceptable, la cual necesitará ser revisada manualmente para reclasificar aquellos datos que no se han podido identificar correctamente.

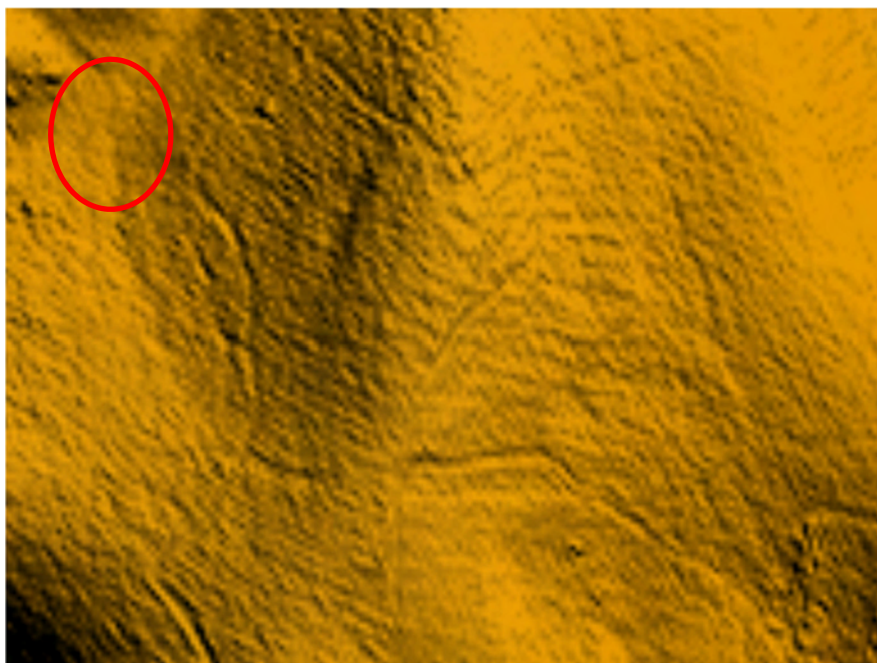
Por lo tanto, la calidad de la clasificación es inherente a la calidad de captura de la información: precisión métrica, densidad y calidad en los metadatos.

### III.1.a. Exactitud temática en los sectores de vegetación

A continuación se adjuntan 4 imágenes distintas para ilustrar el estado de la clasificación para las clases de vegetación y suelo. El sector elegido para realizar el control es un área de vegetación densa (un bosque de repoblación, de hoja marcescente, en Velilla del Rio Carrión, Palencia).

**Imagen 1.** MDS-LIDAR Obtenido desde la clase suelo del LIDAR 2010. Ejecutado para este artículo

---



FUENTE: MDT-LIDAR, ITACyL 2010

---

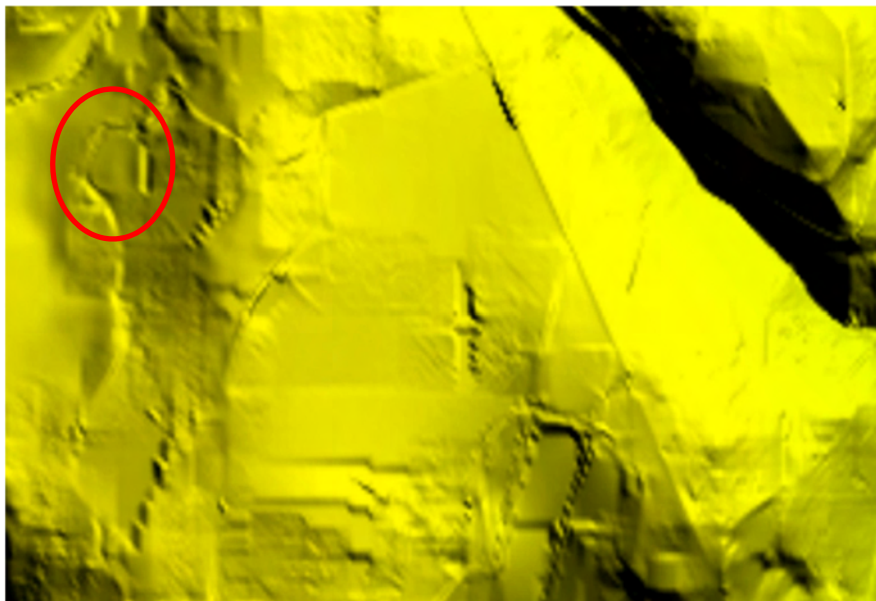
La IMAGEN 1 es el modelo digital del terreno obtenido desde la clase suelo del LIDAR-10; en ella se pueden observar amplias rugosidades y distintas líneas en el terreno.

La IMAGEN 2 es el modelo de terreno que se obtuvo por estéreo correlación de imágenes y en ella se puede apreciar un terreno como cincelado; muestra un relieve bastante irreal.

La IMAGEN 3 muestra el curvado que generamos a partir del modelo del terreno obtenido desde el LIDAR-10 con la clase suelo, junto a la ortofoto de ese mismo sector; en ella se puede observar un curvado muy voluptuoso, que simula como vaguadas en los caminos. Este hecho nos indica que algunos de

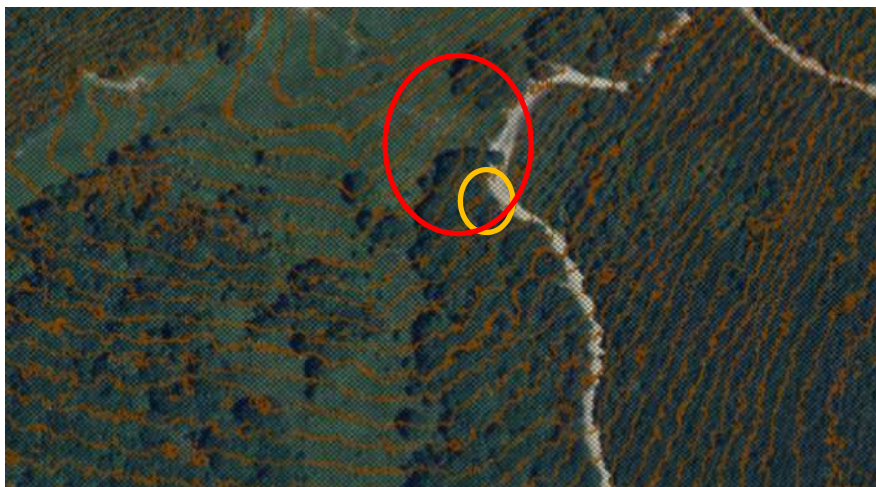
los puntos clasificados como suelo están situados en las copas de los árboles. Una ampliación de esta imagen la recogemos en la IMAGEN 4.

**Imagen 2.** *MDS-PNOA Obtenido por estéreo correlación. 2009*

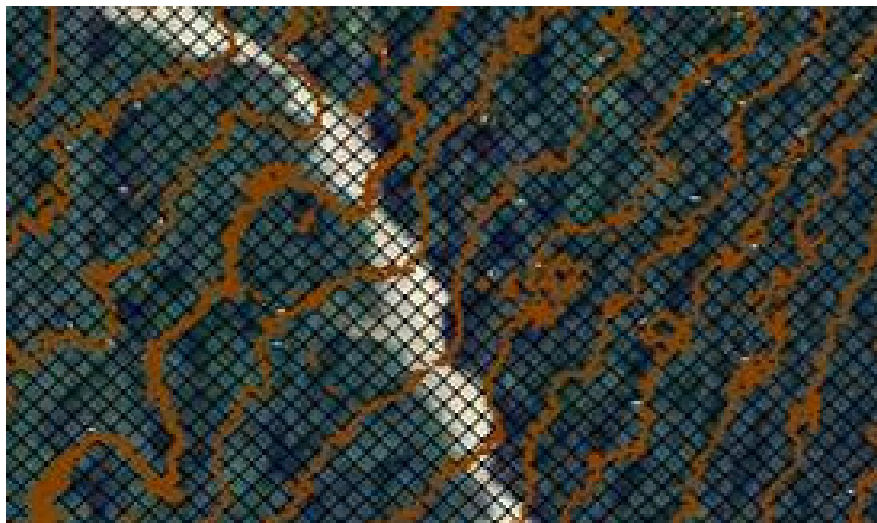


FUENTE: PNOA-CyL-EL-mde. ITACyL 2011

**Imagen 3.** *Curvado del MDT-LIDAR 2010*



FUENTE: MDT-LIDAR, ITACyL 2010

**Imagen 4. Ampliación de la IMAGEN 3**

FUENTE: MDT-LIDAR, ITACyL 2010

Considerando el funcionamiento de los algoritmos para la clasificación del suelo, antes mencionados, teniendo en cuenta la baja densidad de puntos y que este es un sector de vegetación densa, solamente un porcentaje de puntos muy escaso llega realmente al suelo. En consecuencia, los algoritmos tendrán que partir de esos pocos puntos de suelo real y de aquellos que se localizan en las partes más bajas de las copas de los árboles o en los arbustos para generar los planos; como esta información tan laxa o escasa de partida y de cota tan variable, generará planos muy rugosos.

Los caminos de cortafuegos se muestran como vaguadas, porque en estos sectores de suelo desnudo todos los puntos llegan al suelo, pudiéndose así, sobre los caminos, generar planos en el suelo real, mientras que en el resto, como son puntos volados, se generan planos de suelo elevados, dando lugar a ese modelado tan rugoso e irreal.

En definitiva, en los sectores de vegetación densa, cuando hay una baja densidad de puntos, los algoritmos de clasificación suelo arrojan resultados temáticos muy poco exactos.

Por lo tanto, si este LIDAR se utiliza tal como ha sido publicado para realizar análisis de vegetación o extracción de parámetros biofísicos, se puede llegar a conclusiones bastante irreales y muy peligrosas, especialmente si estas se van a destinar para la toma de decisiones en la intervención o modificación del medio natural.



En el MDT de estéreo correlación esta limitación, antes mencionada, ya estaba totalmente asumida y por ello raramente se utilizaba para determinados estudios, aparte de que este MDT no tenía información sobre la altura y porte de la vegetación.

En definitiva, el MDT LIDAR usado tal y como ha sido publicado sin hacer una edición, no nos va a permitir obtener toda la información que se puede extraer del mismo. Lo que es indudable, es que este nuevo producto supone un gran avance para el estudio del medio, máxime considerando que los productos anteriores no tenían ninguna información sobre la vegetación. Por ello, aunque sólo sea a partir de la textura de la información LIDAR, se puede obtener un mapa forestal real.

### *III.1.b. Exactitud temática en los sectores urbanos*

A continuación se adjuntan varias imágenes en las que se refleja la distribución temática de los puntos en un área urbana; concretamente se corresponde con la calle Dársena de Valladolid. La imagen 5 muestra los puntos clasificados como edificios, con la ortofotografía por debajo, lo que nos permite comprobar visualmente un alto grado de coherencia. Todos los puntos azules se ubican sobre algún edificio; sin embargo también podemos observar que hay varios sectores en los que aparecen pocos puntos.

La IMAGEN 6, muestra este mismo sector, donde en color verde se aprecian los puntos clasificados como vegetación y en naranja los puntos clasificados como edificación. En ella se puede constatar que una gran cantidad de puntos vegetación se sitúan sobre los edificios.

**Imagen 5.** Puntos de edificaciones (Sector de área urbana, Barrio de la Victoria, Valladolid)



**Imagen 6.** Puntos de vegetación, edificación y suelo (Sector de área urbana, Barrio de la Victoria, Valladolid)



FUENTE: LIDAR y Ortofotografía PNOA-2010, ITACyL

El algoritmo de máxima pendiente, el cual suele utilizarse para la discriminación entre tejados y árboles, al igual que ocurría con el algoritmo para la detección de suelo, presenta un alto grado de incoherencias temáticas, las cuales se deben en gran medida a la debilidad para clasificar que éste tiene cuando la densidad es muy baja.

Analizando detenidamente los errores y aciertos, podemos constatar que tanto en los tejados grandes como en la parte central de cada lado en los tejados pequeños es donde se da el mayor porcentaje de coherencias. Obviamente, a ello contribuye la propia estructura de los tejados; el área donde hay una continuidad de planos y pendientes es donde el algoritmo funciona correctamente. Sin embargo, en los bordes donde están los cambios y rupturas de planos es donde éste se muestra totalmente ineficaz. De igual modo, el algoritmo se muestra absolutamente ineficaz en los tejados pequeños cuando hay distintas caras contiguas, con elementos que sobresalen: chimeneas, antenas, casetas de ascensores, tuberías de gas natural y patios de luces.

En definitiva, la exactitud temática que presenta este LIDAR en los sectores de núcleos urbanos es muy poco coherente con la realidad.

De igual modo a como se comentaba en el anterior apartado, utilizar estos datos LIDAR para análisis urbanos, en el estado y forma que han sido publicados nos puede llevar a conclusiones bastante alejadas de la realidad.

### *III.1.c. Análisis de la clasificación suelo en los bosques de ribera*

Uno de los principales argumentos, por los que IGN-CNIG, en el año 2009, se embarcó en la campaña de obtención de un LIDAR nacional estribaba en la necesidad legal impuesta por la Unión Europea de llevar a cabo análisis de riesgos de inundación para todos los cauces nacionales, para lo cual necesitaba de un modelo digital del terreno de una alta precisión y densidad, por lo que vamos a realizar un control de calidad temático a los puntos de vegetación y suelo en los bosques de ribera.

El sector elegido para hacer el análisis es un corte transversal del lecho mayor del río Pisuerga a su paso por Valladolid, un sector que por su orografía es muy poco antropizado. Mediante este corte transversal vamos a analizar la disposición altimétrica de los puntos, su exactitud temática y capacidades de este producto para hacer estudios de inundabilidad útiles y reales.

En esta IMAGEN 7 se muestran dos ventanas; la primera representa una vista nadiral del corte con la ortofoto por debajo; muestra los puntos coloreados temáticamente: en verde se reflejan los puntos clasificados como vegetación y en marrón los puntos de suelo. En la segunda ventana se muestra una vista

alzada del corte, donde la distribución y la ubicación de los puntos se establecen conforme a la cota de los propios puntos.

**Imagen 7.** Perfil del lecho del río Pisuegra



FUENTE: LIDAR y Ortofotografía PNOA-2010, ITACyL

Según un primer análisis visual, se puede observar una gran coherencia temática entre ambas clases de puntos, donde los de suelo conforman planos continuos y muy coherentes sobre este, mientras que los de vegetación se distribuyen uniformemente por las copas de los árboles.

En ambas ventanas de la IMAGEN 7 se ha incluido un círculo rojo, utilizado para atraer la atención sobre en la información que queda dentro de este. En los extremos de la línea de agua, concretamente en el primer metro de ribera que está contiguo a la lámina de agua, se pueden observar un pequeño conjunto de puntos marrones (puntos de suelo) que se distribuyen en altura, frente al resto de puntos que configuran el suelo. Este hecho, a priori, podría considerarse como algo de poca entidad; sin embargo, es todo lo contrario, no es un hecho aislado, se da a lo largo de todos los cursos fluviales con lámina de agua y bosque de ribera. Por consiguiente debemos considerarlo como un error sistemático lineal.

La consideración técnica por la que se produce este hecho es la misma que se ha expresado en los apartados anteriores, donde la baja densidad de la información genera una gran debilidad para que los algoritmos puedan funcionar correctamente.



### III.2. La exactitud geométrica del MDT-LIDAR 5x5

El Modelo Digital del Terreno publicado por el IGN, al que llamaremos MDT-LIDAR, es un producto derivado del LIDAR-10 que se realiza a partir de los puntos de clase suelo; su finalidad es sustituir al anterior MDT que se obtenía por fotogrametría, dentro del plan PNOA, al cual llamaremos MDT-PNOA.

El procedimiento para la obtención de este MDT-LIDAR se inicia con la clasificación automática de los datos LIDAR-10 ya realizada; seguidamente hay que hacer una revisión general para detectar aquellos errores groseros o sistemáticos que pudiera haber, para corregirlos. A continuación, estos datos revisados deberán ser analizados manualmente para detectar aquellas imprecisiones temáticas que hubiera y reclasificarlas correctamente para, finalmente, pasar un filtro para extraer los puntos de clase suelo, con los que, mediante procesos de triangulación, generar un archivo MDT con un paso de malla 5x5.

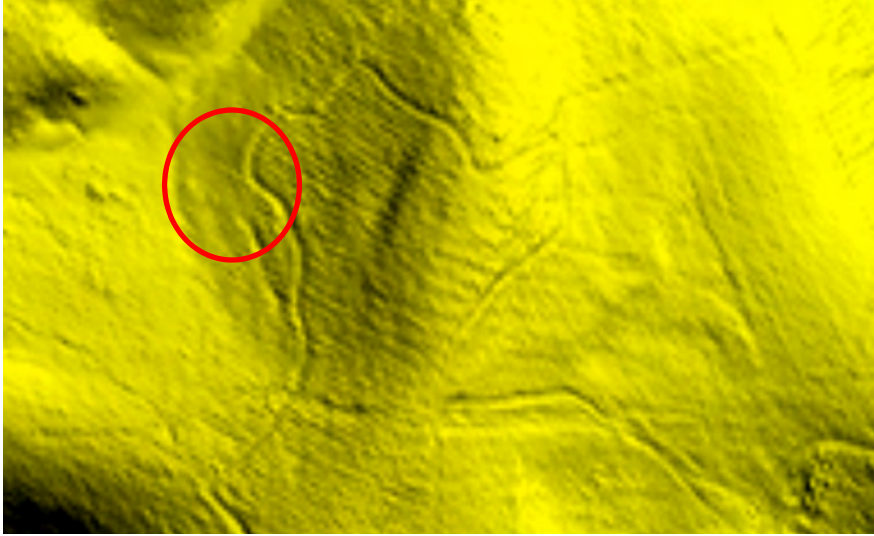
A tenor de los resultados ya observados, la revisión y el análisis en los datos que comprenden toda la superficie de la comunidad de Castilla y León, aún no se ha realizado. Además recordaremos que, según el apartado III.1.1, se constató que la clase suelo no es coherente, ya que el MDE generado a partir de estos puntos da lugar a rugosidades y modelados artificiales que no se corresponden con la realidad. El IGN, con el fin de minimizar esos errores, ha aplicado a ese MDT-LIDAR original un procesado de planos equipotenciales para eliminar esa rugosidad y dejar planos más suaves, lo más parecidos posible a la superficie real; es decir, han realizado un procesado de convolución bicúbica para lograr esa minimización (IGN, 2013).

En la IMAGEN 8 se muestra una vista en tintas hipsométricas del MDT-LIDAR 5x5. En esta imagen se puede apreciar que las rugosidades, antes observadas, se han atenuado un poco; sin embargo, «las vaguadas irreales», los caminos cortafuegos, se siguen distinguiendo claramente. En otras palabras, ese «proceso de suavizado» ha logrado un aspecto mucho más parecido a la realidad del terreno, aunque obviamente no ha logrado eliminar los errores. Por lo tanto, es necesario hacer un control de calidad métrico para determinar qué calidad geométrica tiene este MDT-LIDAR; para así saber cuánta valía podemos dar a nuestros estudios y procesos cuando los realicemos utilizando este producto.

El control de calidad geométrico del MDT-LIDAR de los cuadrantes NW, NE y SE de Castilla y León se realizó mediante una comparativa de la altura ortométrica entre este MDT-LIDAR y los 2.466 puntos de control terrestre en

cota suelo, que tiene el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León en sus bases de datos de puntos de chequeo. Estos puntos se obtuvieron mediante el empleo de técnicas GNSS, con procesado diferencial, para hacer controles de calidad a los productos cartográficos. La precisión de estos puntos utilizados ronda los 2 cm en planimetría y los 3 cm en altimetría.

**Imagen 8.** MDT-LIDAR publicado IGN-CNIG 5x5



FUENTE: LIDAR y Ortofotografía PNOA-2010, ITACyL

En la IMAGEN 9 se muestra una vista en tintas hipsométricas del modelo digital del terreno con la ubicación de los 2.466 puntos de control utilizados.

Por su parte, la TABLA 4 muestra los valores estadísticos de esa comparativa entre la cota del MDT-LIDAR y la cota del punto de chequeo en las coordenadas que representa el propio punto.

**Tabla 4.** Resultados del control de calidad del MDT-LIDAR, en metros

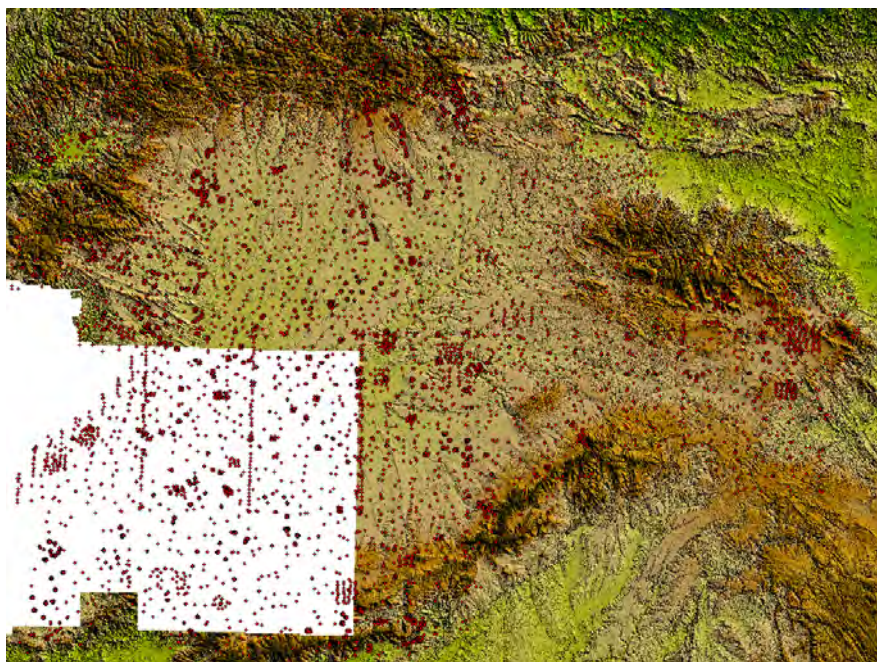
Ítems considerados en el MDT-LIDAR					
A	B	C	D	E	F
2.466	7,85	-4,03	-0,22	0,75	0,78

A, Número de Puntos; B, Diferencia máxima (m.); C, Diferencia mínima (m.); D, Promedio de las diferencias; E, Desviación. Estándar; F, E.M.C.

FUENTE: Elaboración del autor

Los resultados obtenidos muestran un error medio cuadrático de 78 centímetros, lo que indica un valor muy elevado para un producto que procede de un LIDAR y donde, según los criterios de planificación del vuelo, deberíamos tener una precisión en torno a los 20 cm.

**Imagen 9.** MDT-LIDAR publicado IGN-CNIG 5x5



FUENTE: LIDAR y Ortofotografía PNOA-2010, ITACyL

Este modelo digital del terreno MDT-LIDAR pretende mejorar el antiguo MDT, obtenido por estéreo-correlación digital de imágenes de vuelo fotogramétrico, el cual es un producto muy utilizado y perfectamente conocido por la comunidad geomática. Ahora bien, si hacemos este mismo control a ese MDT-PNOA, los resultados obtenidos en relación a la precisión geométrica son los siguientes:

**Tabla 5.** Resultados del control de calidad del MDT-PNOA, en metros

Ítems considerados en el MDT-PNOA					
A	B	C	D	E	F
2.466	9,16	-6,53	-0,25	0,91	0,94

A, Puntos de Control; B, Error máximo; C, Error mínimo; D, Promedio; E, Desviación estándar; F, E.M.C

FUENTE: Elaboración del autor

En definitiva, los valores de calidad para el MDT-LIDAR son un poco mejores que los del MDT-PNOA, pero en una cuantía muy escasa, por lo que se puede apuntar que las mejoras que aporte este nuevo MDT son muy pocas y prácticamente inapreciables.

Si analizamos este MDT-LIDAR mediante un visualizado de tintas hipsométricas y mediante un análisis de pendientes se pueden constatar las siguientes *consideraciones*:

- ✓ Los espacios donde mayor incoherencia temática tiene el LIDAR, según se ha constatado en el anterior apartado III, es en los núcleos urbanos, y considerando que la mayoría de los puntos de control, un 90%, se localizan en los núcleos urbanos, sería lógico ese error tan alto que da el MDT-LIDAR. Por ello este dato no sería suficientemente válido para explicar lo que está pasando en la métrica del MDT-LIDAR en los sectores no urbanos.
- ✓ Esta baja calidad métrica del MDT-LIDAR, en los núcleos urbanos, es la misma que presentaba el MDT-PNOA, la cual dependía de la edición manual, en estereoscopia, que consistía en reubicar correctamente la cota del punto. Esta imprecisión geométrica deberá tenerse en cuenta cuando se pretendan hacer modelos para estudios de riesgos de inundación, ya que donde peor calidad tiene el MDT-LIDAR y donde los riesgos deben ser minimizados al máximo es en las zonas urbanas, por las propias repercusiones que tiene este hecho para la vida de las personas en general y para toda la actividad económica.
- ✓ En las áreas y sectores con vegetación laxa y dispersa la precisión de los puntos se acerca a los valores esperados por la planificación de vuelo (ver nota 3), en torno a los 20 cm (TABLA 2).

#### **IV. CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES FINALES. POSIBLES USOS PARA LA EXPLOTACIÓN DEL LIDAR-10**

a.— Las Consejerías de Medio Ambiente de las Comunidades Autónomas dedican grandes esfuerzos a determinar las mejores técnicas y procedimientos para realizar los aclareos y las podas silvícolas en los bosques naturales y plantaciones forestales; por aclareo se entiende la corta de pies en los rodales de arbolado joven, con el objetivo de reducir la competencia biológica, para mejorar la masa arbórea (MAS, 2009). En consecuencia, a partir de ahora, y una vez publicado el LIDAR-10, este se podría utilizar para determinar algunos parámetros biofísicos del bosque, que permitan reducir y mejorar el trabajo de campo forestal, tal y como han demostrado diversos estudios, destacando entre ellos las investigaciones desarrolladas por el U.S.D.A. (Departamento de

Agricultura de los Estados Unidos), que mediante el uso del LIDAR ha logrado establecer un mecanismo de análisis muy coherente del bosque.

En el caso del LIDAR-2010 de Castilla y León, esta utilidad se ha demostrado muy útil, arrojando informes de intervención muy similares a los emitidos por los propios ingenieros forestales, para plantaciones de pinos. Este hecho tiene lógica, ya que la densidad de pies en un pinar es baja, lo que permite a este LIDAR-10 generar una clase de suelo muy coherente, permitiéndose así medir con gran precisión la altura de los árboles, la copa, la cubierta, ... Sin embargo, en virtud de lo analizado en apartados anteriores, en los sectores de vegetación alta y densa, donde no se puede determinar una clase suelo con cierta coherencia, y por ende no se pueden calcular con un cierto grado de realidad ni la altura ni el porte de los árboles, si se utiliza este LIDAR, tal y como ha sido publicado, sin revisar la clasificación, utilizar métodos de análisis similares a los desarrollados por la USDA no funcionarán correctamente. Obviamente no sería el mismo escenario si este LIDAR fuera editado para reclasificar aquellas inexactitudes temáticas.

En definitiva, la determinación de los parámetros biofísicos de la vegetación y la realización de inventarios forestales son labores propias del mantenimiento de áreas forestales y de los estudios o proyectos de intervención o agresiones al medio, para los cuales este LIDAR-10 podría ser una herramienta valiosísima, siempre que haya sido editado para mejorar su exactitud temática.

b.— Este LIDAR, para la mayoría de las Comunidades Autónomas, es la primera colección que se tiene, y considerando las coyuntura socio-económica que vive España, se podría apuntar con poco riesgo de equivocación que aún se tardará varios años en poder tener una segunda colección, la cual, a tenor de la evolución tecnológica en los sensores LIDAR, va a superar ampliamente, en calidad y densidad, al producto que actualmente tenemos. Por consiguiente, y dado que para realizar una edición no se necesitan grandes partidas presupuestarias, sería conveniente que las Comunidades Autónomas programasen la edición de este producto con la mayor celeridad posible.

En este mismo sentido, insistiendo en la necesidad de abordar la edición del LIDAR, se puede apuntar que mediante el uso de este LIDAR mejorado, la planificación, análisis y desarrollo de los proyectos de las grandes infraestructuras nacionales, así como las intervenciones agrícolas y urbanísticas y medioambientales que desarrollan las Comunidades Autónomas, se podrían planificar con un mayor grado de realidad, lo que permitiría optar por la actuación más coherente con el medio en cada momento y lugar y también, en algunos casos, incluso, con un ahorro de costos.

c.— El estudio de redes hidrográficas, el análisis de escorrentía superficial, el cálculo de avenidas, etc., a partir de ahora se puede realizar con el MDT-LIDAR, al igual que se ha venido haciendo, hasta ahora, con el MDT-PNOA. En virtud de la homogeneidad de este nuevo producto y su alta calidad en los sectores de vegetación laxa y no urbana (el 90% del territorio), los resultados que se obtienen, a priori, serían mucho más fiables, por la utilización de un MDT de mayor calidad.

En los estudios de inundación para los cauces con lámina de agua permanente, los resultados obtenidos, aparentemente, mejoran en calidad y realidad respecto a los informes que se obtenían utilizando el MDT-PNOA. Sin embargo, consideremos lo expuesto en el apartado III.1.3, donde se señalaba que se producía un encajonamiento irreal del lecho menor del río, el cual, para este tipo de estudios, provoca la atenuación del agua desbordada en el cálculo de avenidas, por mayor definición del cauce.

Así mismo se ha de considerar que el MDT-PNOA, publicado anteriormente, era el modelo digital del terreno, en el cual no se reflejaban las obras de fábrica de las infraestructura viales o hidráulicas; sin embargo, el MDT-LIDAR es el modelo digital de superficies, donde sí se reflejan todos los elementos de fábrica.

Por consiguiente, utilizar el MDT-LIDAR en las condiciones actuales, tal y como está publicado, sin revisar el encajamiento, sin modificar las obras de fábrica, o bien sin utilizar un software capaz de considerarlas, da lugar a resultados muy poco coherentes con la realidad y, por supuesto, muy peligrosos para la población y las actividades económicas, ya que los impactos calculados serían menores por la atenuación de la lámina de agua.

d.— En los procesos de ortorrectificación, debido a que el MDT-LIDAR está suavizado y presenta una gran homogeneidad, mejora la métrica final de las ortofotografías con respecto al método anterior, que usaba el MDT-PNOA.

e.— Las labores de protección civil para el rescate de personas en el monte, la gestión de incendios, el análisis de uso y ocupación de suelo, la creación de cartografía derivada (mapas de pendientes, orientaciones, visibilidad, etc.), tanto para el análisis del medio físico como para posibles intervenciones en el medio, utilizando los datos LIDAR o el MDT-LIDAR, mejorarán mucho y serán más fiables, porque los datos son más homogéneos.

En este sentido, independientemente de que no se pueda calcular correctamente la altura real de los árboles en algunos sectores, por primera vez contamos con un producto que nos informa de la altura absoluta del terreno con

todos sus elementos, lo cual, en función del tipo de estudios o de intervenciones es muy útil.

En definitiva, la utilización tanto del LIDAR-2010 como del MDT-LIDAR, si se desea hacer una explotación fiable y coherente con la realidad del medio, requiere que los propios usuarios editen estos productos para modificarlos al mejor estado posible, según sus necesidades. Por consiguiente, y dado que la edición es una práctica obligada para todos aquellos que vayan a utilizar estos productos, sería conveniente que las administraciones públicas nacionales y autonómicas se plantearan y ejecutaran con la mayor celeridad posible una de estas opciones: la mejora de los productos existentes mediante la edición, la obtención de una segunda colección LIDAR, o bien, ambas opciones.

En cualquier caso, como dato esperanzador, recientemente el Centro Nacional de Información Geográfica y la Junta de Castilla y León han firmado un convenio de colaboración que, entre otras, cosas contempla la edición temática de este LIDAR-10, por lo que en pocos meses posiblemente podríamos contar con un LIDAR completamente editado.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGHIOS, N.; VOSSELMAN, G.; SITHOLE, G. (2006): «Aerial Laser Scannign. Institut of Cartography and Geoinformatics», University of Hannover, Germany. Comission VI. I.S.P.R.S.
- CRESPO MOZO, M.; MANSO ISABEL, M.I. (2014): *Control de Calidad del vuelo lidar utilizado para la modelización 3D de las Fallas de Alhama (Murcia) y Carboneras (Almería)*. Ed. Universidad Politécnica de Madrid.
- GALARZA GALARZA, M. (2014): *Control de Calidad de datos LIDAR aerotransportado en la zona austral del Ecuador*. Ed. Departamento de posgrados, Universidad de Azuay.
- GARCÍA, M.; PRADO, E.; RIAÑO, D.; CHUVIECO, E. y DANSON, F. M. (2009): «Ajuste planimétrico de datos LIDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo», *GeoFocus* (Artículos), nº 9, p. 184-208.
- HABIB, A. y VAN RENS, J. (2009): «Quality assurance and control of LIDAR system and derived data», Ed. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol 75. Nº 9. ASPRS.
- IGN (2013): *Información auxiliar MDT05/MDT05-LIDAR*. Web de descargas del IGN-CNIG.
- KARL HEIDEMANN, H. (2014): *LIDAR Base Specification*. U.S. Departament of the Interior, U.S. Geological Survey. U.S.G.S.
- KATZENBEISSER, R. (2003): «About the calibration of LIDAR sensors». Workshop de ISPRS 3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data. Dresden, Alemania.

- KORNUS, W. y RUIZ, A. (2003): «Strip j adjustment of LIDAR data». Workshop de ISPRS 3-D reconstruction from airborne laser scanner and InSAR data. Dresden, Alemania.
- MAIMAN, T. (2001): *The laser Odyssey*, ebook Amazon student.
- MAS PORRAS, J. (2009): «Aclareos y Podas Silvícolas en bosques naturales y Plantaciones forestales». Ed. *Guía para el manejo forestal sostenible*, cuadernillo N°1.
- MINISTERIO DE FOMENTO, ESPAÑA. (2009): *Sistema de aseguramiento de la calidad – PNOA. Anexo B*. Ed. Instituto Geográfico Nacional.
- PARRA ARTERO, F.J. (2013): *Evaluación de diferentes algoritmos de filtrado de datos LIDAR para la Clasificación automática de suelo desnudo y microrrelieve. (Edificios, invernaderos y vegetación)*. Ed. Universidad de Córdoba.
- RODRÍGUEZ RICO, O.O. (2009): *LIDAR vs Fotogrametría para la obtención de modelos digitales de elevaciones para los estudios hidrológicos*. E.d. USAL.
- RUANO, E. (2008): *Control de la exactitud posicional en cartografía*. Ed. Instituto geográfico militar.
- RUIZ A. y KOMUS, W. (2007): *Experiencias y Aplicaciones LIDAR*, Ed. Institut Cartografic de Catalunya.
- SMITH, C. y PINKER, A. (2000): «Galileo: it turns». Ed. *Position Location and Navigation Symposium*, IEEE 2000. San Diego, CA. USA.
- WOLFGANG, K. (2008): *Calibración del sensor y ajuste del bloque*. Ed. Institut Cartografic de Catalunya.
- ZHANG, K. y WHITMAN, D. (2005): *Comparasion of three algorithms for filtering airborne LIDAR data*. Ed. Photogrammetric engineering and remote sensing 71.
- ZHANG, K.; CHEN, S.; WHITMAN, D.; SHYU, M.; YAN, J. y ZHANG, C. (2003): *A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data*. Ed. Transactions on geoscience and remote sensing, 41. IEEE