



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1589

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Clasificación de suelo a partir de retornos LiDAR en masas densas de frondosas

VILLASANTE PLÁGARO, A.M. (1) y SEVILLA MARTÍNEZ, F. (2)

- (1) Universidad de Lleida.
(2) Junta de Castilla y León.

Resumen

El LiDAR aéreo es una tecnología que cada vez está más extendida en el sector forestal, sobre todo a partir del nacimiento del proyecto PNOA-LiDAR en 2009. La precisión de los resultados en el inventario forestal basado en información LiDAR depende en gran medida de la calidad del modelo digital del terreno (MDT). La elaboración de estos modelos presenta problemas en el caso de masas forestales densas de frondosas o cuando el sotobosque es espeso, debido a que la mayoría de los pulsos LiDAR rebotan en la vegetación. La escasez de rebotes en el suelo dificulta o imposibilita la elaboración de un MDT de suficiente precisión.

El objetivo de este trabajo es comparar los resultados de la clasificación de los puntos de suelo obtenidos mediante dos técnicas: la clasificación ofrecida por el PNOA y el filtrado mediante el algoritmo CSF. La comparación se realizará mediante transectos LiDAR lineales elegidos de forma aleatoria. Los muestreos se efectuarán en dos zonas del norte de Burgos con masas densas de hayas y robles.

Palabras clave

CSF, MDT, inventario forestal, transecto

1. Introducción

Disponer de un modelo digital del terreno (MDT) de gran precisión es sumamente útil en multitud de trabajos relacionados de forma directa con la gestión forestal. La mayoría de las actuaciones sobre los montes deben tener en cuenta su topografía como factor condicionante de primer orden. Ejemplos en este sentido podrían ser el trazado de pistas y de calles de desembosque, el tipo de maquinaria a utilizar o las medidas de prevención de la erosión. Pero también otros trabajos donde su diseño no está en principio tan condicionado por la topografía están afectados de una u otra forma por ella: así, el coste de los tratamientos selvícolas, y de casi cualquier actuación, es mayor donde la pendiente es más acusada y, con un carácter más general, son mayores las dificultades para el desplazamiento de máquinas y personas. El MDT también es esencial para la elaboración de los modelos digitales de copas, a partir de los cuales se realizan los inventarios forestales basados en el LiDAR aéreo.

Hasta hace pocos años un plano topográfico a escala 1:10.000 se consideraba suficiente para los objetivos habituales de los trabajos previos a las actuaciones forestales sobre el terreno. Con la irrupción de la tecnología LiDAR se ha abierto un mundo de posibilidades, hasta el punto de que cuando se dispone de una nube

de puntos suficientemente densa se considera que muchos de los trabajos que antes había que realizar forzosamente en el campo y con gran coste y a veces penosidad, como los inventarios dasométricos, se pueden sustituir por el manejo de la información LiDAR. Sin embargo, hay que asumir que todavía nos encontramos en un punto de desarrollo incipiente en cuanto a las posibilidades que esta tecnología puede proporcionar. En este artículo se exponen algunas limitaciones a las aplicaciones más habituales de los vuelos LiDAR en zonas donde la gran densidad de la vegetación restringe enormemente la llegada de pulsos láser al suelo. En estos casos, los algoritmos generales utilizados para la clasificación de puntos de suelo no sirven para alcanzar los objetivos habituales.

La clasificación de los puntos de suelo puede obtenerse a partir del campo escalar *Classification*, que el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea incorpora a sus nubes de puntos LiDAR (PNOA-LiDAR). El valor 2 de este campo escalar indica que ha sido clasificado como Suelo, coincidiendo con el criterio de la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección. Este campo escalar se ha incluido en las tres coberturas del PNOA LiDAR realizadas hasta la actualidad. Utilizar la clasificación del PNOA es una forma muy sencilla de obtener los puntos del MDT y funciona razonablemente bien en la mayoría de las situaciones. Sus principales deficiencias se producen en zonas donde las copas son tan densas que pocos retornos LiDAR alcanzan el suelo (Figura 1). Este problema ha sido mostrado por SEVILLA (2024). Este inconveniente se agrava debido a que muchos de los puntos de la nube son clasificados con el valor 12 (Solapes) y aunque algunos puedan corresponder a suelo, el PNOA los rechaza debido a los estrictos límites de error de las posiciones X, Y, Z de los retornos. Cuando los MDT se elaboran a partir de pocos puntos de suelo, en el modelo creado aparecen interpolaciones que intentan rellenar los huecos existentes (Figura 2).

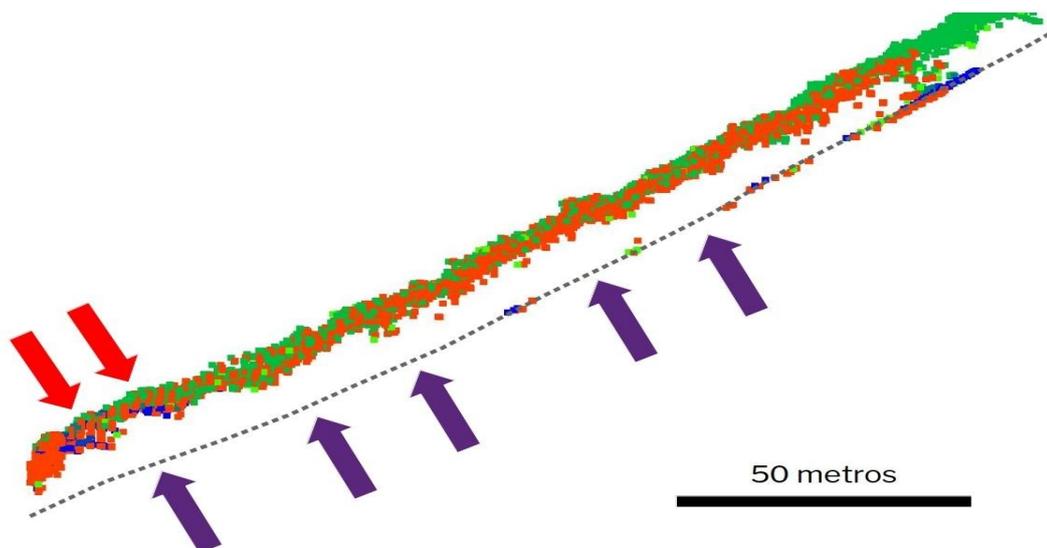


Figura 1. Transecto LiDAR en hayedo de ladera correspondiente a la primera cobertura PNOA.

Se ha añadido una línea de trazos para indicar la posición correcta del suelo,

obtenida a partir de los puntos de suelo de la segunda cobertura. Los puntos clasificados por PNOA como Suelo están coloreados en azul y los clasificados como Solape en rojo. Se observa que en la zona baja de la ladera erróneamente se han clasificado puntos de copas como suelo (flechas rojas). También puede apreciarse que extensas zonas de la ladera no presentan retornos LiDAR que hayan llegado al suelo (flechas azules).

Aunque la clasificación del PNOA es muy utilizada debido a la sencillez de su empleo, existen otros algoritmos que permiten la clasificación de los puntos de suelo de una nube de puntos LiDAR. ZHANG *et al.* (2003) desarrollaron el Filtro morfológico progresivo para la clasificación a partir de los puntos de menor altitud dentro de un tamaño de ventana ajustado por el usuario. Este filtro fue desarrollado para detectar los puntos de suelo en entornos urbanos (eliminando edificios, vehículos, monumentos, etc.). Posteriormente, ZHANG *et al.* (2016) desarrollaron el filtro CSF mucho más utilizado en la actualidad en el sector forestal. Este método consiste en invertir la nube de puntos y simular que se deposita un tejido sobre ella. El tejido quedaría retenido por los puntos más altos (que corresponden a los puntos más bajos por estar la nube invertida).

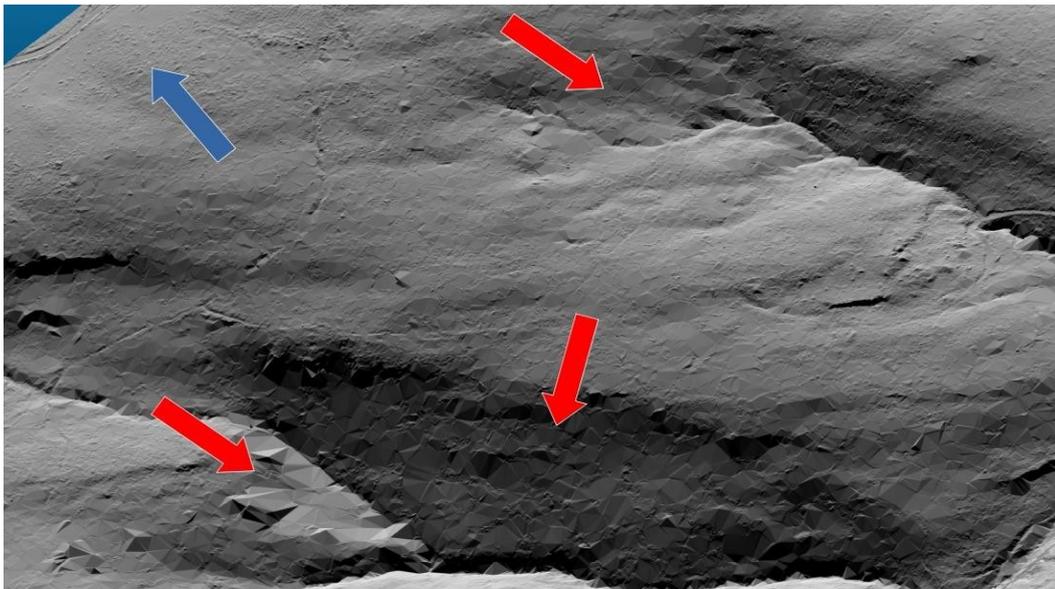


Figura 2. MDT que incluye algunas zonas con escasez de puntos de suelo. Los huecos se interpolan y aparecen superficies triangulares de aspecto artificial (flechas rojas). En las zonas con abundancia de puntos de suelo (zona marcada con flecha azul) la textura del MDT es más natural (matorrales, pista, etc.).

2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es comparar la clasificación de los puntos de suelo obtenidos mediante el campo escalar incluido en el PNOA y mediante un filtrado CSF, en dos zonas de vegetación espesa de frondosas con copas densas situadas en el norte de la provincia de Burgos. Se analizará tanto la primera cobertura como la segunda, que son las actualmente disponibles en las áreas de estudio.

3. Metodología

Se va a trabajar en dos ubicaciones del norte de Burgos (Figura 3).

El área más al nordeste, en el Valle de Mena, que denominaremos zona Anzo, alrededor de las coordenadas 478300, 4768600 (uso 30N). Corresponde a un bosque denso de ladera de *Fagus sylvatica*, con presencia puntual de pies de *Quercus faginea*, así como algunos pinos (*Pinus radiata* y *P. nigra*) plantados en terrazas pero que generalmente fracasaron debido a la sombra de las hayas.

La zona ubicada más al suroeste, en el término municipal de Alfoz de Santa Gadea, la denominaremos zona Hijedo, alrededor de las coordenadas 422200, 4752200 (uso 30N). Corresponde a un bosque mixto denso de ladera formado principalmente por *Quercus petraea* y *Fagus sylvatica*, con ejemplares dispersos de *Quercus robur* y *Taxus baccata*, y un subpiso de *Ilex aquifolium* que con frecuencia es sumamente abundante.

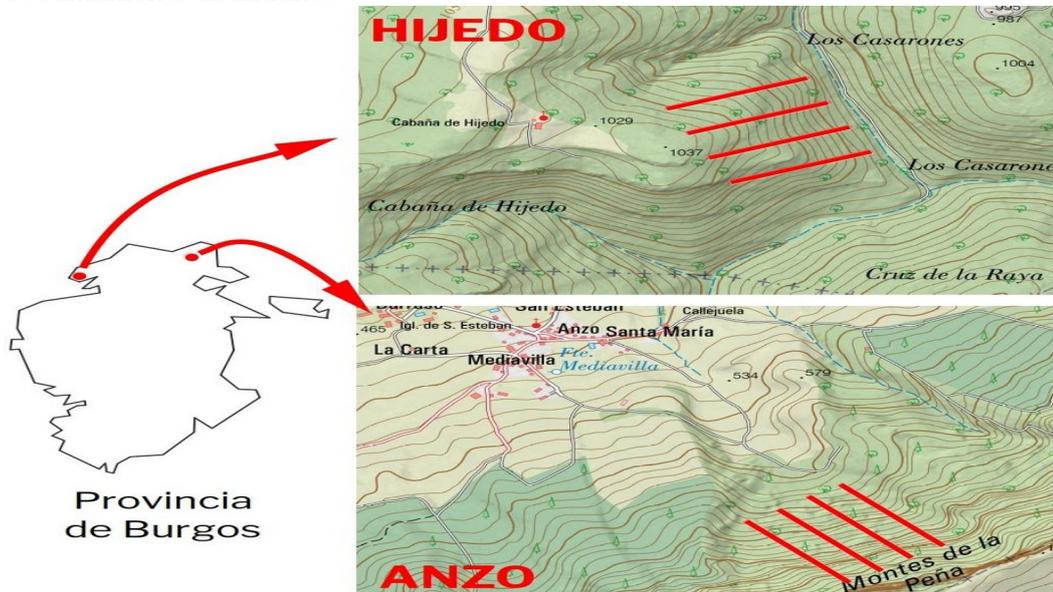


Figura 3. Ubicación general y situación de los transectos (líneas rojas).

En cada una de las dos zonas se seleccionó un recinto de 500 m x 500 m, sobre el que plantearon cuatro transectos paralelos de 400 m de longitud y 20 m de anchura (separación de 100 m entre los ejes de los transectos), orientados aproximadamente a favor de la pendiente. La superficie de cada transecto fue 8000 m².

Las nubes de puntos LiDAR fueron obtenidas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) dentro del PNOA y correspondieron a la primera cobertura (vuelo realizado en septiembre de 2011 con una densidad de 0,5 pulsos/m²) y la segunda cobertura (vuelo realizado en septiembre de 2020, 4 pulsos/m²).

Las nubes de puntos fueron analizadas con el programa de procesamiento de

nubes 3D CloudCompare (CLOUDCOMPARE PROJECT, 2024). Los puntos de suelo se obtuvieron filtrando los puntos con valor 2 en el campo escalar *Classification* (método PNOA). Esta clasificación fue comparada con el filtro CSF (*Cloth Simulation Filter*) elaborado por ZHANG *et al.* (2016). Para este segundo método se utilizó una resolución de tela de 2 m y un umbral de 1 m en el caso de las nubes poco densas de la primera cobertura LiDAR. Estos parámetros también fueron adecuados para la segunda cobertura de Hijedo. Sin embargo, ofrecieron resultados deficientes en la segunda cobertura de Anzo, por lo que en este caso los parámetros fueron sustituidos por una resolución de tela de 0,5 m y un umbral de 0,5 m.

Las secciones correspondientes a los transectos de 20 m de anchura fueron giradas según los tres ejes hasta que se pudo detectar con claridad la posición del suelo. Sobre esta vista se recortaron los puntos correspondientes al suelo real, separándolos de los correspondientes a vegetación real. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de este proceso de selección manual de los puntos de suelo real.

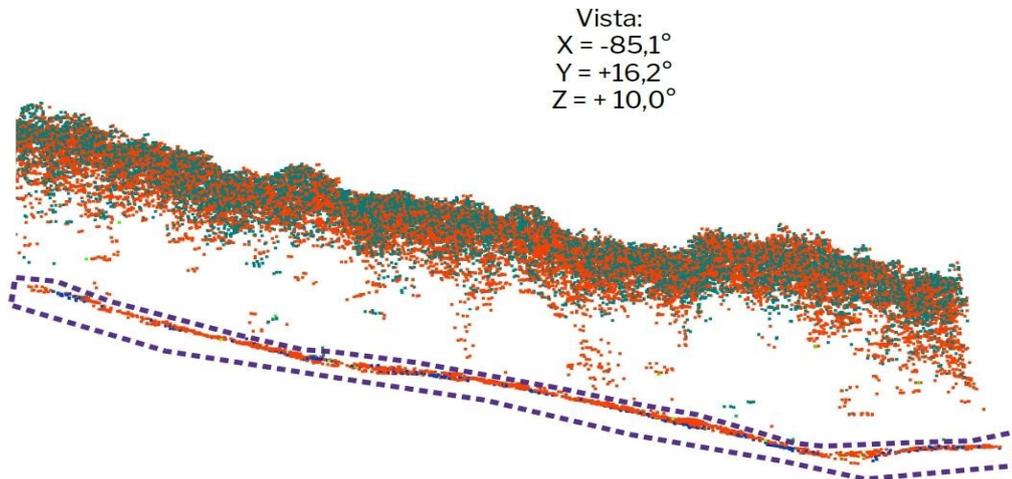


Figura 4. Selección manual de los puntos de suelo real (línea azul oscuro punteada). Se puede observar que la vista no coincide con los ejes porque se ha buscado la que resalta mejor los puntos de suelo.

La clasificación utilizando el método PNOA y la clasificación utilizando el filtro CSF fueron comparadas con la clasificación real de los puntos de suelo y de vegetación, obtenida de acuerdo a lo expuesto anteriormente. Para establecer la calidad de la clasificación se calcularon la sensibilidad y la especificidad. Estos parámetros fueron definidos por YERUSHALMY (1947) para diagnóstico en medicina y son de uso habitual en la estimación de la calidad de clasificadores. La sensibilidad se obtuvo mediante el porcentaje de puntos asignados por el clasificador a la clase Suelo respecto a los puntos de suelo real. La especificidad se calculó mediante el porcentaje de puntos asignados por el clasificador a la vegetación respecto a los puntos de vegetación real. Las diferencias de sensibilidad y especificidad fueron analizadas en cada zona y cobertura LiDAR mediante un análisis de varianza (0,05 de nivel de significación).

4. Resultados

A continuación se indican los resultados de la clasificación obtenida a partir de PNOA y a partir del filtro CSF, en valores absolutos (Tabla 1). Las tablas 2 y 3 muestran la calidad de estos métodos de clasificación a partir de la sensibilidad (capacidad de detección de los puntos de suelo) y la especificidad (capacidad de detección de los puntos de vegetación).

Tabla 1. Número de puntos clasificados como suelo obtenidos con PNOA y con el filtro CSF (media de los cuatro transectos)

Zona	PNOA suelo		CSF suelo	
	bien clasificado	mal clasificado	bien clasificado	mal clasificado
Anzo 2011	59	9	54	30
Anzo 2020	8937	1090	14545	81
Hijedo 2011	433	26	1057	64
Hijedo 2020	2859	442	6142	559

Tabla 2. Sensibilidad del método PNOA y del filtro CSF en cada zona y cobertura a partir de los transectos (n.s. = no significativo)

Zona	PNOA	CSF	P-valor
Anzo 2011	90,6%	76,8%	n.s.
Anzo 2020	89,1%	99,5%	0,00003
Hijedo 2011	93,7%	94,2%	n.s.
Hijedo 2020	87,0%	91,3%	n.s.

Tabla 3. Especificidad del método PNOA y del filtro CSF en cada zona y cobertura a partir de los transectos (n.s. = no significativo)

Zona	PNOA	CSF	P-valor
Anzo 2011	92,0%	99,1%	n.s.
Anzo 2020	99,8%	98,3%	0,011
Hijedo 2011	99,2%	97,7%	n.s.
Hijedo 2020	99,9%	98,9%	0,026

5. Discusión

Aunque se asume con carácter general que las alturas de la vegetación proporcionadas por la información LiDAR son sumamente precisas (error máximo de 40 cm en la primera cobertura y 20 cm en la segunda) para que esto ocurra tiene que existir un MDT de gran precisión, pero esto no se puede garantizar cuando el número de pulsos que llegan al terreno es bajo. En el ejemplo de Anzo se conjugan un bosque denso de hayas con una ubicación topográfica al pie de un cortado calizo en dirección este-oeste (coincidente con la orientación de los vuelos PNOA LiDAR) que limita la captura de los retornos de los pulsos con los ángulos exigidos por el IGN.



En el caso del robledal de Hijedo, se añade el obstáculo que supone el denso subpiso de acebo, que une su impenetrabilidad al carácter perennifolio, lo que elimina la opción de volar en invierno para solventar el problema. A este respecto, se han efectuado pruebas con LiDAR transportados por un dron, con densidades de pulsos muy elevadas (hasta varios cientos por metro cuadrado) y de momento tampoco han servido para mejorar apreciablemente la precisión de los resultados, aunque este es un campo en el que es probable que haya considerables avances en los próximos años.

Comparando los resultados del LiDAR de 2011 (Tabla 1), se detecta la gran dificultad de obtener puntos de suelo en el caso del hayedo de Anzo. Los resultados fueron similares con las dos técnicas, obteniéndose como media poco más de 50 puntos capaces de alcanzar el suelo en los 8000 m² de cada transecto. A esto se añade su distribución, que se concentra en pequeñas zonas (huecos entre las copas), dejando grandes superficies del transecto sin ninguna información para elaborar el MDT. En el caso de Hijedo, también se detecta escasez de puntos de suelo que puede atribuirse a la escasa densidad de pulsos de la primera cobertura (0,5 pulsos/m²), a la espesura del dosel de copas y, donde existe, del subpiso de acebo. A pesar de ello, el método de PNOA es capaz de detectar alrededor de 400 puntos de suelo en los transectos de Hijedo. El filtrado CSF obtiene unos resultados más favorables, 1000 puntos, más del doble del número de puntos de suelo de PNOA. Esto es debido a que CSF también utiliza los puntos de solape (PNOA los desecha por sus restricciones en el ángulo de escaneo). La diferencia en los resultados, 13,2 puntos cada 100 m² en el caso del método CSF y 5,4 utilizando PNOA, puede ser crítica cuando el número de puntos de suelo es escaso, como es el caso de las cubiertas arbóreas estudiadas.

Montealegre *et al.* (2015) también encontraron problemas en la correcta identificación de los puntos de suelo, en su caso en zonas de vegetación de matorral espeso (*Quercus coccifera*, *Juniperus oxycedrus*). En estas zonas los errores alcanzaron aproximadamente el doble del obtenido en pinares de *P. halepensis* sin este subpiso.

La cobertura LiDAR del año 2020 mejora claramente los resultados en las dos zonas (Tabla 1). Esto puede atribuirse a la mayor densidad de pulsos inicial (4 pulsos/m²). Este incremento se refleja en los puntos de suelo detectados, entre 3000 y 15000 puntos dependiendo de la zona y el método. Podemos observar como el método CSF duplica el número de puntos de suelo que se obtiene con el método PNOA. Este incremento se puede explicar por los puntos clasificados por PNOA como solape, que se presentan en una cantidad similar a la de puntos clasificados como suelo. En el peor de los casos, Hijedo con el método PNOA, se obtuvieron 2859 puntos de suelo, lo que representa una densidad de 36 puntos cada 100 m² de superficie.

Es destacable indicar que el hayedo de Anzo presentó menos puntos de suelo en la primera cobertura LiDAR que el robledal mixto de Hijedo (aproximadamente la



décima parte). Sin embargo, los resultados se invierten en la segunda cobertura, con aproximadamente el doble de puntos de suelo en Anzo que en Hijedo. Estas diferencias no parecen ser explicadas por la caída de las hojas dado que los vuelos LiDAR se realizaron los días 11 y 12 de septiembre. Una posible explicación estaría relacionada con la gran expansión que en los últimos años ha experimentado el sotobosque de acebo en Hijedo.

Respecto al porcentaje de acierto de la clasificación de los puntos de suelo, se puede observar que las sensibilidades son similares, no encontrándose diferencias significativas en ningún caso, excepto en la zona Anzo en la segunda cobertura. En este caso, el aumento de la sensibilidad de CSF frente a PNOA es bastante evidente. En el caso de la primera cobertura LiDAR de Anzo, la sensibilidad de PNOA parece ser mayor, sin embargo esta diferencia no fue estadísticamente significativa, lo que refleja la gran dispersión de resultados entre los transectos de este hayedo cuando la densidad de pulsos LiDAR es baja.

La tabla 3 muestra la capacidad de detección de puntos clasificados como vegetación. Se puede observar que en la primera cobertura LiDAR no se detectan diferencias entre el método PNOA y el filtro CSF. Estas diferencias sí aparecen en la segunda cobertura, presentando mejores resultados PNOA. Sin embargo, las diferencias en valores absolutos son escasas, ya que en todos los casos la especificidad fue superior al 98%.

Una estrategia útil para utilizar las nubes de puntos de la primera cobertura LiDAR en zonas de vegetación densa podría ser emplear o añadir los puntos clasificados como suelo en la segunda cobertura. La incertidumbre espacial en planta es similar y pequeña, con una precisión planimétrica menor de 30 cm en ambas y RMSE de la coordenada Z menor de 40 cm en la primera cobertura y 20 cm en la segunda, por lo que los posibles desajustes serán muy reducidos. Por otra parte, hay que tener en cuenta que entre ambos vuelos LiDAR podrían presentarse cambios de cierto calado debido a movimientos de tierra, consecuencia de actividades humanas o de procesos naturales.

6. Conclusiones

Aunque para los habituales objetivos de gestión forestal se pueden asumir como suficientes las precisiones obtenidas en el establecimiento del MDT a partir de la información LiDAR con los dos métodos analizados, esta afirmación está sujeta a excepciones, en particular en lugares donde existe una gran densidad en la vegetación y donde la posición topográfica es desfavorable debido a que llegan menos pulsos láser hasta el suelo. Cuando se conjugan estas circunstancias el MDT y por tanto la altura de la vegetación pueden presentar un margen de error considerable.

La clasificación efectuada con el método CSF ofreció una calidad en zonas de arbolado denso de frondosas similar a la obtenida con PNOA. La diferencia se encontró en el número absoluto de puntos clasificados como suelo,



aproximadamente el doble en el caso del filtro CSF. Esto es debido a que se utilizan también los puntos desechados por PNOA que quedan incluidos en la clase Solape. En el caso de escasez de retornos laser de suelo, como ocurre con la combinación de densidad de pulsos pequeña y densidad de copas elevada, esta diferencia puede ser decisiva.

7. Bibliografía

CLOUDCOMPARE PROJECT, 2024. CloudCompare, versión 2.13.2 Kharkiv. www.cloudcompare.org.

MONTEALEGRE, A.L.; LAMELAS, M.T.; DE LA RIVA, J. 2015. A comparison of open-source LiDAR filtering algorithms in a mediterranean forest environment. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens* 8, 4072-4085.

PNOA LiDAR. Proyecto LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Instituto Geográfico Nacional.

<https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/presentacion>.

SEVILLA, F. 2024. Gestión forestal: integrando la complejidad. Colegio Oficial de Ingenieros de Montes, 711 pp.

YERUSHALMY, J. 1947. Statistical problems in assessing methods of medical diagnosis with special reference to x-ray techniques. *Public Health Reports* 62 (2): 1432-39.

ZHANG, K.; CHEN, S.-C.; WHITMAN, D.; SHYU, M.-L.; YAN, J.; ZHANG, C. 2003. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE T Geosci. Remote Sens.* 41(4), 872 - 882.

ZHANG, W.; QI, J.; WAN, P.; WANG, H.; XIE, D.; WANG, X.; YAN, G. 2016. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sens.* 2016, 8(6), 501.