



9CFE-1710

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

Organiza





Oportunidades y Limitaciones del LiDAR PNOA multitemporal para el seguimiento de los ecosistemas forestales

TOMÉ, J.L. (1), BENGUA, J. (2), BALLESTEROS, E. (3), MARTÍNEZ, J. (3), MARTÍN-ALCON, S. (1)

(1) Agresta Sociedad Cooperativa

(2) Junta de Castilla y León. D.G. de Patrimonio Natura y Política Forestal

(3) Instituto Geográfico Nacional

Resumen

España es un país privilegiado en cuanto a la disponibilidad de datos LiDAR en abierto para el estudio de nuestros ecosistemas forestales. A fecha del presente congreso estará prácticamente completa la tercera cobertura de nuestro país, lo que supone que contamos con LiDAR multitemporal a lo largo de los últimos quince años con un enorme potencial para el estudio de los ecosistemas forestales. Sin embargo, si bien tenemos disponibles varias coberturas estas no han sido obtenidas exactamente en las mismas condiciones (fase fenológica, modelo de sensor, entre otros), habiendo diferencia no solo entre distintos vuelos, sino también dentro de un mismo vuelo cuando se prolongan en el tiempo. Trabajar con datos en grandes superficies o LiDAR multitemporal requiere conocer cuáles son sus principales limitaciones, así como los procedimientos para poder comparar los resultados analizados de una manera coherente. El presente artículo pretende dar unas pautas generales orientadas a que los usuarios de los datos puedan tomar las adecuadas precauciones de uso de los mismos, así como poner sobre la mesa la necesidad de que la ciencia forestal española siga estudiando la transferibilidad espacial y temporal de los modelos LiDAR de cara que se pueda exprimir todo el potencial de los mismos.

Palabras clave

Inventario forestal, laser escáner aéreo, transferibilidad.

1. Introducción

La tecnología LiDAR data de los años 60, sin embargo, no fue hasta finales de 1990 cuando comenzó a aplicarse para uso forestal (WANG et al, 2020), ya que hasta entonces los retornos de la vegetación eran considerados ruido pues el principal objetivo de la misma era generar modelos digitales de elevaciones precisos.

No es hasta principios del siglo XXI cuando se produce una verdadera revolución en el sector forestal debido a la gran capacidad de estos sensores LiDAR para recolectar datos espaciales georreferenciados de forma automática y eficiente (WEHR and LOHR, 1999), al tiempo que se generan metodologías como la de métodos de masa (NAESSET, 2002a) que permitían la estimación de variables



forestales dasométricas con un gran potencial en la reducción de tiempos de trabajo y costes asociados.

A nivel nacional, a finales de la primera década de este siglo comenzaron a hacerse vuelos LiDAR con dos fines diferentes. Por un lado, en 2008 desde el IGN se lanza la primera cobertura LiDAR-PNOA cuya primera intención fue mejorar la cartografía de zonas inundables, con una densidad de 0,5 puntos por m² a nivel nacional. En aquel momento, la bibliografía científica establecía que estos vuelos LiDAR de baja resolución eran insuficientes para realizar inventario forestal, por lo que la entrada del LiDAR al sector forestal español llegó a través de vuelos específicos de la mano de Blom España, una filial española de Blom Internacional. De esta manera en el congreso forestal de Ávila, CUASANTE y GARCÍA (2009) presentan los resultados de algunos de los primeros inventarios LiDAR realizados en nuestro país para una serie de montes públicos en Burgos.

Sin embargo, la llegada de la crisis originada por la quiebra de Lehman Brothers a la administración española supuso un freno absoluto a los inventarios LiDAR basados en vuelos específicos. La escasez presupuestaria de la administración imposibilitaba abordar estos inventarios cuyos costes derivados de la necesidad de levantar un avión específicamente para la captura de datos eran relativamente elevados.

La puesta en abierto de los datos LiDAR PNOA de la primera cobertura, supuso una oportunidad para que tanto las empresas españolas familiarizadas con las aplicaciones forestales con LiDAR como los investigadores nacionales comenzaran a explorar su uso potencial para inventarios forestales. Pronto fue evidente para los usuarios que los resultados obtenidos a partir de datos LiDAR de baja resolución por métodos de masa (modelización estadística de variables dasométricas a partir de estadísticos de la nube de puntos LiDAR) eran suficientemente buenos para realizar inventarios forestales fiables (GONZÁLEZ-FERREIRO et al, 2012).

Hoy día en España estamos a punto de completar la tercera cobertura (GARRIDO et al, 2022), tenemos datos LiDAR disponibles en múltiples adquisiciones temporales de las 3 coberturas con las que se han abordado trabajos de monitorización forestal (GÓMEZ et al, 2019), abriendo la posibilidad para cuantificar dinámicas forestales (DALPONTE et al., 2019). Sin embargo, debemos ser conscientes de que, si bien el producto LiDAR PNOA tiene una cierta homogeneidad, existen importantes diferencias tanto entre las distintas coberturas como dentro de cada lote de vuelo que constituye una cobertura.

Trabajar con datos LiDAR en grandes superficies y con LiDAR multitemporal requiere conocer cuáles son las principales limitaciones de los mismos, así como las características intrínsecas de la tecnología LiDAR, para que los análisis de los datos obtenidos y los modelos estadísticos generados con los mismos puedan ser utilizados de una manera coherente.



A través del presente artículo, los autores pretendemos dar a conocer las citadas limitaciones tomando como ejemplo lo que pasa en Castilla y León, una comunidad que por extensión y catálogo histórico de vuelos LiDAR es representativa de la situación a nivel nacional.

2. Objetivos

El objetivo del presente artículo es dar unas pautas generales orientadas a que los usuarios de los datos LiDAR puedan tomar las precauciones necesarias en el uso de los mismos, así como poner sobre la mesa la necesidad de que la ciencia forestal española siga estudiando la transferibilidad de los modelos estadísticos desarrollados para el inventario forestal, de cara que se pueda exprimir todo el potencial de los mismos.

3. Metodología y Resultados

La tecnología LiDAR proporciona de forma casi directa un volumen enorme de información de las superficies forestales y de la estructura del bosque. Un adecuado procesado de la nube de puntos LiDAR nos permite estimar de forma casi directa variables forestales de gran utilidad para la planificación y gestión forestal, como la fracción de cabida cubierta arbórea (FCC), la altura dominante (H_o), la existencia o no de continuidad vertical u horizontal de los combustibles, etc. En un segundo paso ajustamos modelos estadísticos que relacionen distintas métricas obtenidas del LiDAR con información tomada en campo podemos calcular también las principales variables dasométricas de inventario forestal como el número de pies (N), el área basimétrica (G), el volumen de madera de fuste (VCC), el incremento anual en volumen con corteza (IAVC) o el diámetro cuadrático medio (D_g), además de índices de competencia o variables que describen el modelo de combustible o el posible comportamiento del fuego.

A pesar de que los sistemas LiDAR ofrecen un enorme potencial, la calidad de estas métricas está fuertemente condicionada por una serie de factores, destacando entre otros la fecha de captura, la densidad de captura, el número de retornos capturados, la precisión altimétrica del dato LiDAR y su resolución o sensibilidad vertical. Todos estos parámetros dependen tanto de la capacidad de penetración del sensor y su resolución vertical, como de la configuración de la operación de vuelo: frecuencia de barrido, altura de vuelo, densidad de puntos, FOV, etc.

En la figura 1 podemos observar las diferencias en las características técnicas que más influencia pueden tener en las métricas LiDAR relacionadas con la altura y la cobertura de la vegetación para las dos coberturas disponibles y las estipuladas por pliego para la 3ª cobertura prevista para finalizar el verano de 2025.

Cobertura	lote	Sensor	Inicio vuelo	Fin vuelo	FOV	Frecuencia Pulso (Hz)	Densidad (pts/m2)	Nº retornos	Resolución vertical (m)	Precisión Z (m)	Intensidad (bits)	Patron escaneo
1ª	CyL-Rioja	Leica ALS-50	ago-10	nov-10	50	82.200	0,5	4	3,5	0,17	8	sinusoidal
1ª	CyL_SE_Madrid	Leica ALS-50	sep-10	nov-10	17-60	91.800	0,5	4	3,5	0,17	8	sinusoidal
1ª	CyL_NW	Leica ALS-50	oct-10	nov-10	35-50	91.800	0,5	4	3,5	0,15	8	sinusoidal
1ª	CyL_SW	Leica ALS-60	nov-14	jul-15	30-47	91.800	0,5	4	2,8	0,6	8	sinusoidal
2ª	CyL_SE	Leica ALS-80	nov-17	dic-18	50	249.000	1	6	0,7	0,15	8	sine, triangle, raster
		IGI LM780	nov-17	dic-18	50	266.667	1	4	0,7	0,15	8	lineas paralelas
2ª	CyL_NE	RIEGL LMS-Q1560	oct-19	oct-21	50	140.000	4	4	0,7	0,15	8	lineas paralelas
2ª	CyL_C	Leica ALS-80	sep-19	oct-19	50	324.400	1	6	0,7	0,15	8	lineas paralelas
2ª	CyL_NW	OPTECH GALAXY	jun-21	oct-21	50	700.000	2	8	0,7	0,15	16	lineas paralelas
2ª	CyL_SW	RIEGL VQ1560i	sep-19	jul-20	50	140.000	4	4	0,7	0,15	8	lineas paralelas
3ª	CyL	OPTECH GALAXY	mar-25	oct-25	34-45	800.000	5	8	0,7	0,10	16	lineal

Figura 1. Características técnicas de las distintas capturas LiDAR realizadas en el marco del Proyecto PNOA.

A continuación, vamos a describir los principales parámetros de configuración de un vuelo LiDAR y sus posibles relaciones con el cálculo de las métricas LiDAR:

Fecha de Vuelo: La fecha de vuelo condiciona totalmente la estructura de la nube de puntos debido a la propia fenología de la vegetación en las especies caducifolias y marcescentes.

El vuelo LiDAR de la segunda cobertura (PNOA2) en Castilla y León fue realizado en una amplia variedad de fechas entre el 14 de noviembre de 2017 y el 15 de octubre de 2021. La Figura 2 ilustra esta circunstancia, desde los colores rojos (14/11/2017-21/11/2017) y amarillos (15/6/2018-29/11/2018) del cuadrante sureste hasta los morados del noroeste (11/6/2021-8/10/2021; con 17 días efectivos de vuelo). El cuadrante central fue volado entre el 19/9/2019 y el 3/10/2019 en tan solo 7 días efectivos de vuelo. Los que presentan mayor mezcla de fechas son el nordeste (3/10/2019, 19-20/2/2020, 10-14/9/2020, 10/6/2021-15/10/2021) y suroeste (15/8/2019-27/10/2019 y 21/2/2020-25/7/2020), si bien no fueron estas las principales dificultades encontradas en el procesado de los datos de estos dos cuadrantes.

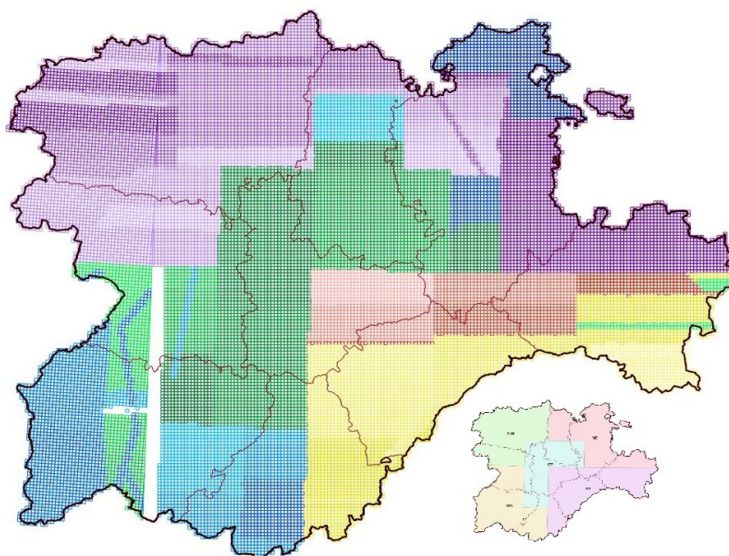


Figura 2. Fecha de vuelo del LiDAR-PNOA2 en Castilla y León (fecha del último punto volado de cada bloque 2x2 km). En pequeño los cuadrantes de vuelo.

La principal consecuencia de esta variedad de fechas son las diferencias fenológicas, ya que la distribución de retornos cambia notablemente dependiendo de si el arbolado tiene hoja o no (frondosas caducifolias). Este es un factor clave que dificulta las aplicaciones forestales de la tecnología LiDAR.

Para realizar inferencia de variables dasométricas a partir de métricas LiDAR, la captura debe hacerse en condiciones fenológicas homogéneas (con hoja o sin hoja, pero no mezclando ambas fases). Resulta particularmente negativo volar durante los periodos de brotación o desfronde por la inconsistencia de las métricas a que da lugar, tal y como se ilustra a continuación. La fase fenológica “con hoja” parece la más viable para la planificación de los vuelos LiDAR por ofrecer el intervalo más amplio, estable fenológicamente y favorable meteorológicamente para el vuelo. Tiene el inconveniente de que la penetración de los pulsos dentro del dosel de cubierta vegetal es menor y, en condiciones de alta espesura, puede aportar menos información de la estructura interna del arbolado y de la situación del suelo y su microrelieve. Lo cierto es que la conveniencia de una u otra fase fenológica depende de los objetivos del vuelo LiDAR, siendo, en todo caso, contraproducente la mezcla de fases o las fases de transición.

Las distintas especies arbóreas de Castilla y León tienen calendarios fenológicos diferentes, con fechas de brotación mayoritaria en abril, pero que va desde marzo para las choperas más precoces hasta finales de mayo para el rebollo (GUADA et al, 2018). Esta especie es la más abundante en Castilla y León con más de 600.000 ha (MITECO, 2021) y su fenología, tan tardía, siendo tres semanas posterior a la de sus congéneres *Q. robur* y *Q. petraea* (SOUTO HERREDO et al., 2005).

La caída de la hoja también se produce en un intervalo de varias semanas, debiendo tomarse en este caso como referencia el inicio del desfronde, que se produce a finales de septiembre, si bien, la otoñada de algunas especies se inicia

algo antes de esta fecha (p. ej. el amarilleamiento de las choperas). La duración de esta fase de caída de la hoja es inferior a un mes para las especies caducifolias estrictas, mientras que en otras (las marcescentes) se alarga varios meses, manteniendo una parte de la hoja hasta final de año o incluso del invierno en ejemplares jóvenes.

En resumen, para garantizar que un vuelo LiDAR se realice en condiciones de homogeneidad en lo que se refiere a la fenología de las frondosas caducifolias, debe realizarse entre junio y septiembre si se opta por la fase “con hoja” o de diciembre a febrero si se opta por la fase “sin hoja”.

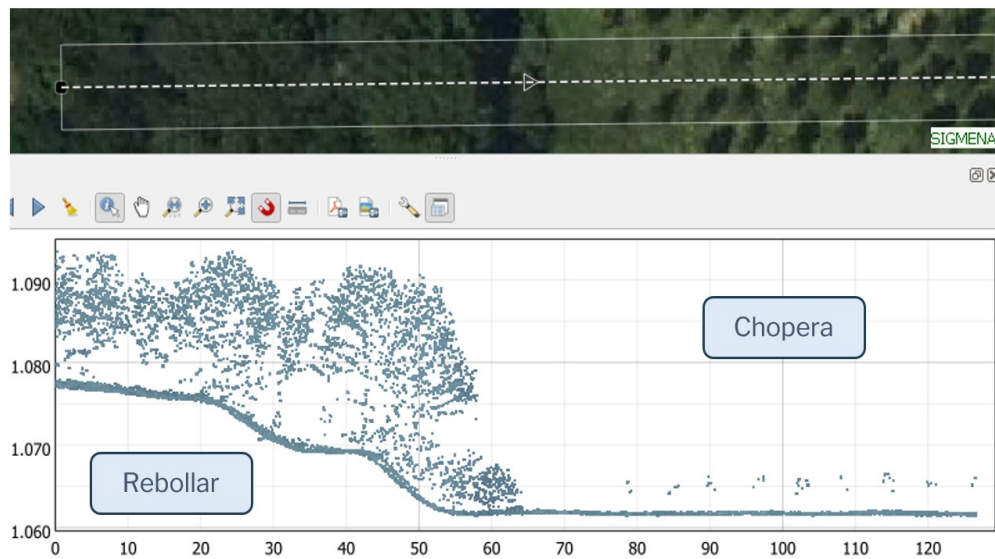


Figura 3. Perfil LiDAR volado el 20/2/2020 (sin hoja) en Mantinos (Palencia)

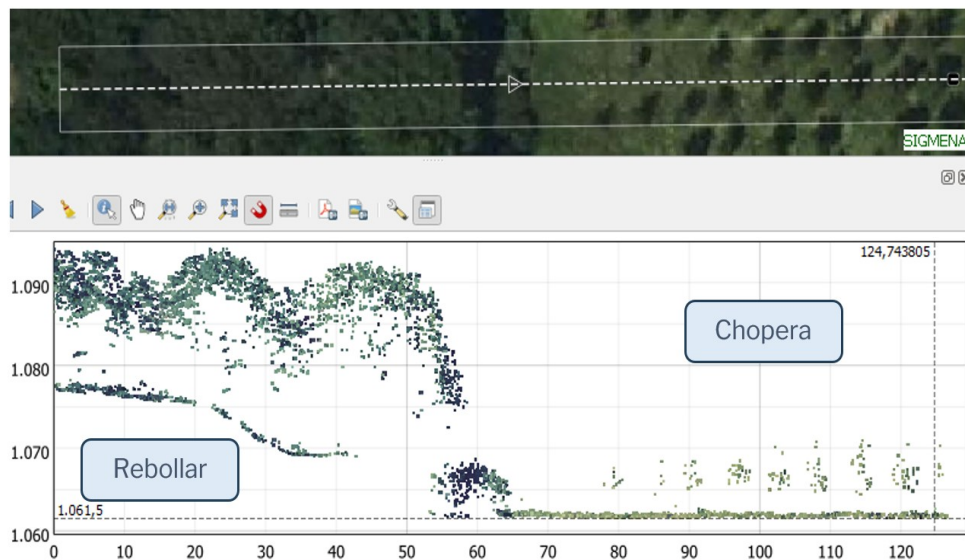


Figura 4. Perfil LiDAR volado el 19/7/2021 (con hoja) en Mantinos (Palencia)

Las zonas de solape entre zonas de vuelo de distintas fechas permiten poner de manifiesto las diferencias existentes cuando un mismo arbolado se vuela en dos momentos fenológicos diferentes. En las figuras 3 y 4 se muestran dos perfiles de una misma localización (Mantinos, Palencia), con un rebollar maduro (16-21 m) a la izquierda y una plantación joven de chopos (7-9 m) a la derecha. La figura 4 ha sido volada el 20/2/2020 (sin hoja) dentro del bloque nordeste y la figura 5 el 19/7/2021 (con hoja) dentro del bloque noroeste.

Las diferencias en la distribución de los retornos son muy claras tanto en el caso del rebollar, como en la chopera. En consecuencia, las métricas generadas son igualmente diferentes y la inferencia que se realiza con éstas da lugar a estimaciones distintas.

Como muestra, en la figura 5 se muestran visualmente los percentiles 95 (izquierda) y 65 (derecha) de alturas sobre el suelo para el vuelo sin hoja (arriba) y con hoja (abajo). Las diferencias son manifiestas, no solo en el percentil 65, cosa esperable (en el rebollar desciende desde los 10-15 m con hoja a los 0-3 m sin hoja), sino también en el percentil 95, con un descenso cercano a los 2 m en el rebollar y el cambio de los 5-6 m de la chopera con hoja a cero metros sin hoja.

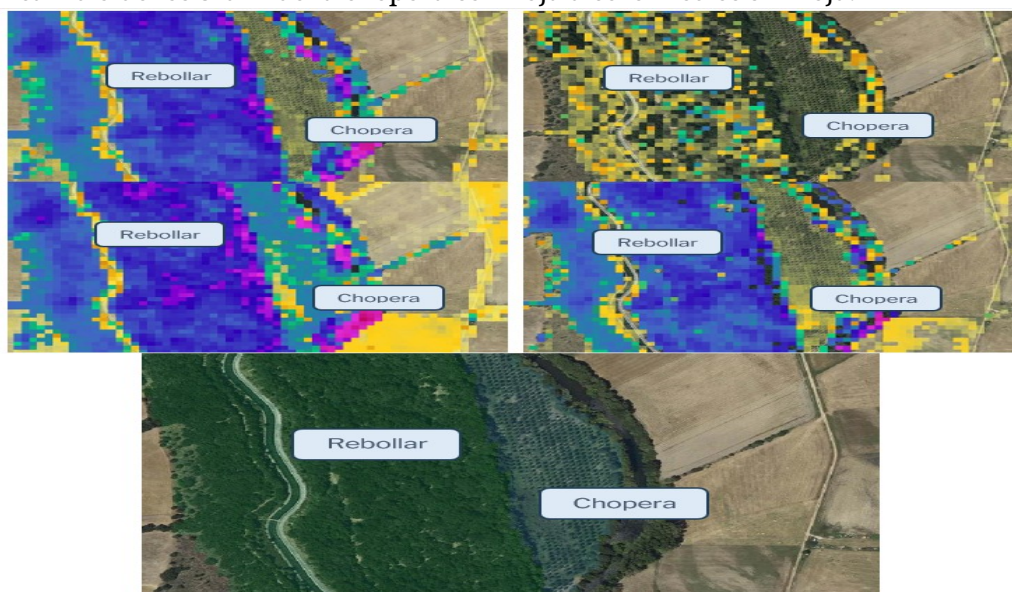


Figura 5. Comparativa de percentiles de alturas sobre el suelo 95 (izda) y 65 (dcha) en vuelo LiDAR sin hoja (arriba) y con hoja (abajo). Debajo: ortofoto. Escala de color del amarillo (más bajo) al morado (mas elevado)

Como consecuencia de esta diferencia de valores en las métricas, la inferencia que se hace con modelos LiDAR basados en estas métricas genera resultados diferentes con hoja y sin hoja. En el ejemplo expuesto, si usamos el modelo de estimación del volumen con corteza para el rebollo en el estrato denominado "Páramos detríticos y cuenca del Duero", generado dentro del proyecto dasolidar de la Junta de Castilla y León y obtenido con parcelas voladas con hoja, la estimación del volumen con corteza usando las métricas con hoja en una parcela de 50 m de radio en el rebollar es de 222 m³/ha, mientras que con las métricas generadas sin hoja obtenemos 162 m³/ha, un 27% inferior. (Los detalles del

proyecto dasolidar se pueden consultar en:
<https://medioambiente.jcyl.es/web/es/medio-natural/gestion-forestal.html> y
<https://www.researchgate.net/profile/Jose-Bengoa/publications>).

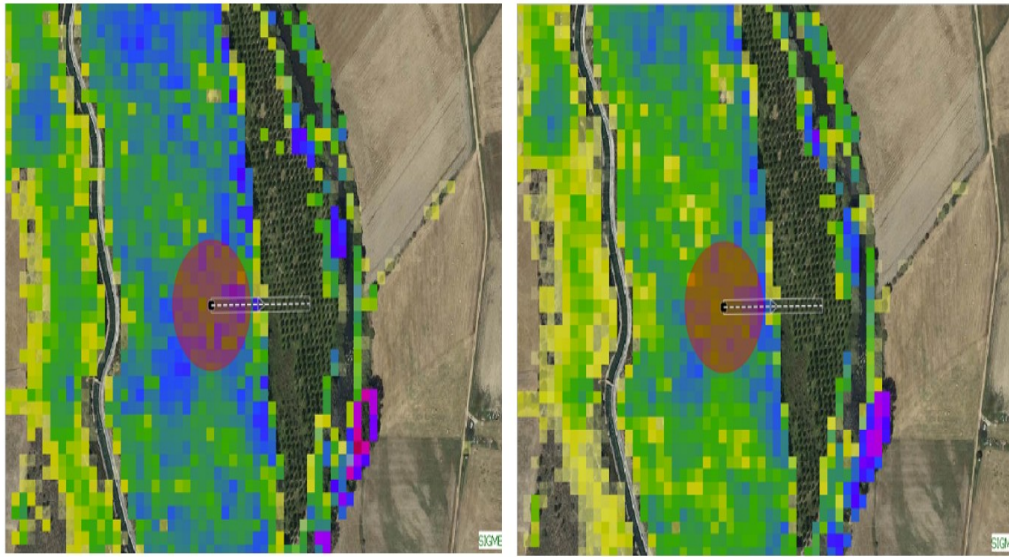


Figura 6. Comparativa de volúmenes de madera en rebollar estimados usando métricas con hoja (izquierda) y sin hoja (derecha). Escala de color del amarillo (menor volumen) al morado (mayor volumen)

Field of View (FOV). El ángulo del pulso con respecto a perpendicular a la línea de vuelo determina el campo de visión. A mayor FOV, mayor área, sin embargo, los puntos de los extremos se capturan con mayor incertidumbre. Cuanto menor sea el FOV más detallado será el escaneado de la masa forestal y mayor será la penetrabilidad (HSU et al, 2015). El PNOA especifica un FOV siempre inferior a un 50 ° en sus vuelos.

Densidad de puntos: La densidad obtenida viene determinada por la configuración de la misión de vuelo, parametrizando correctamente altura de vuelo y velocidad en función de las especificaciones del sensor LiDAR (frecuencia de barrido, frecuencia de pulso, FOV, patrón de escaneo, solape requerido).

Por otro lado, debemos tener en cuenta que los datos LiDAR proporcionados por PNOA incluyen puntos de solape, provocando un aumento de densidad en dichas zonas. El solape es el porcentaje de la huella de registro repetida por dos o más pasadas. Los puntos de solape se suministran etiquetados como clase 12, según los códigos de clasificación definidos por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS), con objeto de poder ser excluidos en los procesados forestales.

La densidad es un parámetro fundamental para la estimación o cálculo de atributos forestales a partir de datos LiDAR, determinando incluso la posibilidad de aplicar dos enfoques distintos en función de la densidad de puntos LIDAR disponible:

- Alta densidad (> 2 pts/m²): posible aplicación de métodos de estudio de árbol individual con LiDAR.
- Baja densidad (< 2 pts/m²): posible utilización de métodos de masa para la estimación de variables dasométricas, resultados a nivel de celda a partir de la distribución de alturas de los retornos.

Tal como hemos visto, con algunas excepciones las densidades disponibles en España a nivel nacional gracias al proyecto PNOA LiDAR oscilan hasta la fecha entre 0.5 (1^a cobertura) y 2 (2^a cobertura) pulsos/m², razón por la cual hasta el momento la mayor parte de estudios realizados en España son por métodos de masa. Sin embargo, la tercera cobertura LiDAR va a poner a disposición de investigadores y empresas forestales, nubes de puntos de 5 pulsos/m², lo que previsiblemente debería mejorar la calidad de las estimaciones por métodos de masa siendo probable que en los próximos años veamos un desarrollo a nivel operativo de metodologías que trabajen con métodos de árbol individual.

El siguiente ejemplo permite ilustrar las diferencias de densidad de pulsos. Se trata de una misma zona volada con dos densidades distintas dentro del LiDAR-PNOA2; el de arriba dentro del cuadrante NW volado el 12/10/2021 a 4 pulsos/m² nominales pero 7 reales y el de abajo fue volado el 28/9/2018 a 1 pulso/m².

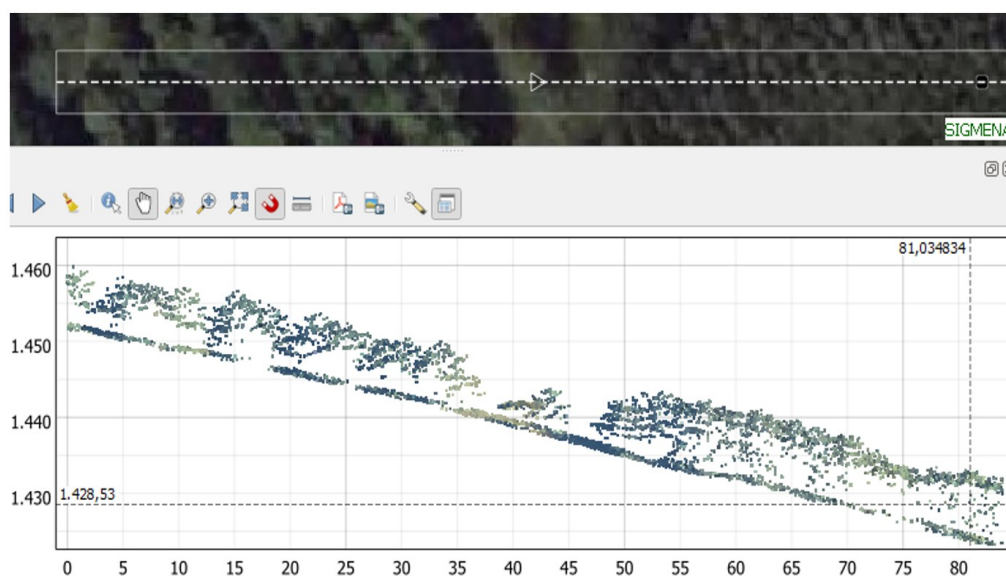


Figura 7. Perfil LiDAR volado el 12/10/2021 (7 pulsos/m²) en Sierra del Madero (Soria)

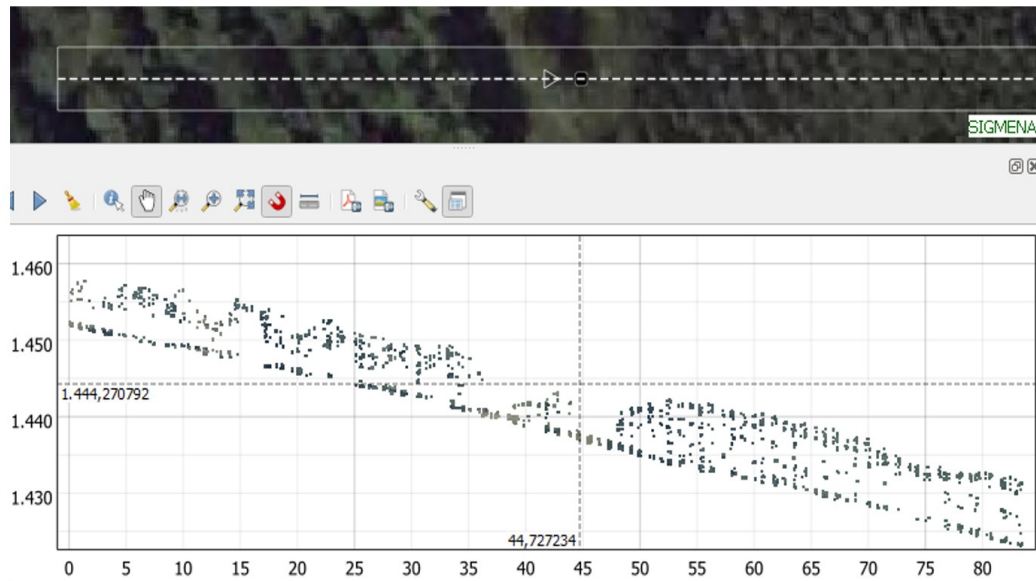


Figura 8. Perfil LiDAR volado el 29/9/2018 (1 pulso/m²) en Sierra del Madero (Soria)

La influencia de la densidad de pulsos en las métricas no es tan evidente como la de la fenología y cambia de métrica a métrica. Analizar y cuantificar la influencia de la densidad escapa del alcance del presente estudio, no obstante, a modo de ejemplo, en la figura 9 se muestra el efecto de las diferencias de densidad en dos métricas. El percentil 95 de alturas sobre el suelo y el porcentaje de primeros retornos a más de 3 m sobre el suelo en una zona que incluye un rebollar y un pinar de 7-12 m y 5-7 m de altura respectivamente. El percentil 95 de alturas es ligeramente menor (0,5-1,0 m) en la zona volada con 1 pulso/m², si bien esto es debido en parte a que ese vuelo es 3 años anterior al volado con 7 pulsos/m². Por su parte, las diferencias en el porcentaje de primeros retornos a más de 3 m sobre el suelo no siguen un patrón o consistencia evidentes.

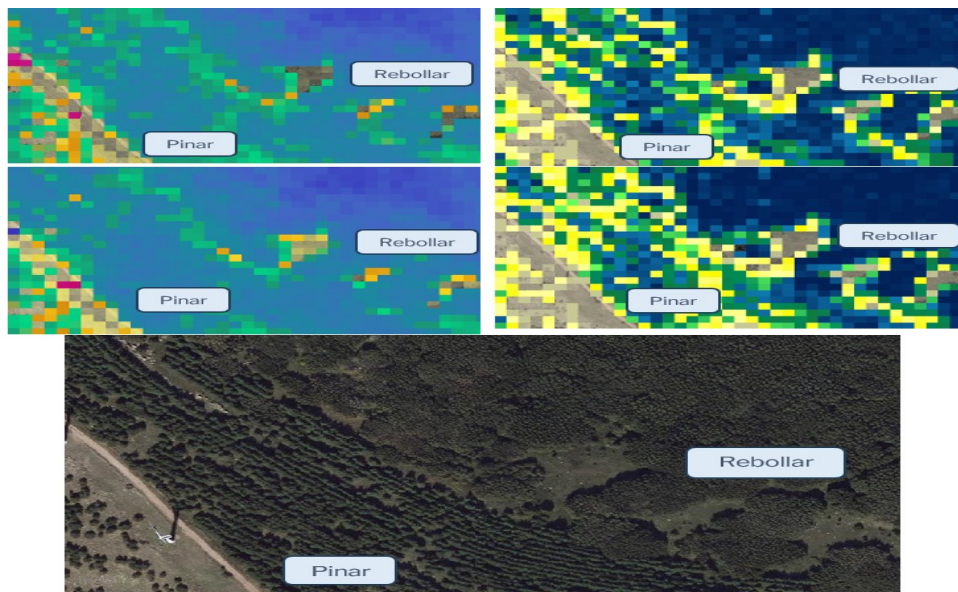


Figura 9. Comparativa de percentiles 95 de alturas sobre el suelo (izda.) y porcentaje de primeros retornos a más de 3 m sobre el suelo (dcha.) en vuelo



LiDAR a 7 pulsos/m² (arriba) y 1 pulso/m² (abajo). Debajo: ortofoto.

Precisión altimétrica y sensibilidad vertical: la capacidad de los sistemas LiDAR para medir con precisión la altura de la vegetación depende de varios factores como son el tamaño y la reflectividad del objeto sobre el que incide el pulso, la densidad de los datos, el diámetro del pulso, la precisión altimétrica del sensor y su sensibilidad vertical, o el método de detección de cada retorno (BALTSAVIAS, 1999). Además de estos factores relacionados con el sensor, la precisión en la estimación de las alturas depende de otros factores como las especies y la forma de las copas (HYYPPÄ et al, 2004).

La evolución tecnológica de los sensores LiDAR en los últimos años nos permite disponer de sistemas con mejores precisiones en Z, inferiores a los 15 cm. Además, la sensibilidad vertical o distancia mínima vertical entre retornos capaz de capturar, ha disminuido drásticamente en los LiDAR de última generación, pasando del entorno de los 3 metros entre retornos de los sensores utilizados en primera y segunda cobertura PNOA, a ser inferiores al metro en la captura actual, aumentando con ello su potencial en la modelización de coberturas forestales con mayor precisión y detalle. Este va a ser un factor muy importante a tener en cuenta siendo necesario ponderar esta gran diferencial de sensibilidad Z, en el ajuste de modelos predictivos que combinen conjuntos de datos LiDAR de la tercera cobertura con datos de coberturas anteriores.

La calidad altimétrica general de los datos derivados del LiDAR depende de una serie de errores que pueden agruparse en cuatro categorías: (i) errores causados por el propio sistema de medición, (ii) errores debidos a las características de la configuración del vuelo (iii) errores creados durante el procesamiento de datos y (iv) errores debidos a las características de los objetos capturados, en concreto por ejemplo la pendiente aumenta el error altimétrico a medida que aumenta.

Hay que tener en cuenta que los métodos desarrollados para calcular métricas de altura de la vegetación a partir de datos LiDAR se basan de forma general en la obtención de la altura de la vegetación de una manera sencilla a partir de la resta del MDE con respecto al MDS. De esta manera se obtiene lo que generalmente se llama modelo digital de altura de la vegetación (MDAV), que representa la altura de la vegetación en cada píxel: $MDAV = MDS - MDE$, por lo que a medida que mejora la densidad de puntos y precisión altimétrica de los vuelos mejora la consiguiente resolución espacial (horizontal y vertical) de los modelos digitales generados a partir de ellos incluida la altura de la vegetación.

Número de retornos: el número de retornos que puede llegar a proporcionar cada pulso, al igual que la sensibilidad vertical, ha aumentado desde los equipos utilizados en la primera y segunda cobertura (4 retornos en general) a los 8 o más retornos de los sensores de última generación. Esta diferencia de resolución debe ponderarse adecuadamente en la generación y análisis de modelos multitemporales.



Intensidad: los sistemas LiDAR registran la intensidad de cada uno de los retornos, la cual representa la cantidad de energía reflejada. La energía recibida depende de las propiedades del sistema LiDAR, el ángulo de incidencia, la reflectividad del objeto sobre el que incide el pulso, la absorción atmosférica y la distancia sensor-objeto (COREN & STERZAI, 2006). A consecuencia de estos factores, la intensidad puede variar entre distintas adquisiciones, regiones o incluso a lo largo de la misma línea de vuelo. Por tanto, comparar los valores de intensidad entre líneas de vuelo, campañas de adquisición y distintos sensores es complejo y no se recomienda para estimaciones forestales. En caso de utilizarlo, resulta imprescindible normalizar la intensidad corrigiendo los efectos atmosféricos, el efecto de la distancia, la energía del pulso y el ángulo de incidencia si la campaña de adquisición ha incluido varios ángulos de campo de visión, o frecuencias de emisión de pulsos (VAIN et al., 2010). Por otro lado, la mayoría de los sistemas comerciales registran pulsos discretos y no proporcionan información sobre los algoritmos empleados para detectar los pulsos, de manera que la intensidad puede corresponder a la intensidad máxima registrada en un intervalo de tiempo o integrar la energía registrada en dicho intervalo (HÖFLE & PFEIFER, 2007). Además, la evolución tecnológica de los sensores ha supuesto un cambio de resolución en el registro de la intensidad, pasando de 8 bits en primera y segunda cobertura, a 16 bits de la cobertura actual.

Patrón de escaneo: Los distintos fabricantes de sensores LiDAR utilizan sistemas que pueden ser giratorios o no giratorios, con diferentes elementos ópticos deflectores como prismas, rejillas y espejos que crean patrones de exploración específicos. Los sistemas de espejo basculante, utilizados por los sistemas Leica ALS50/60 en la primera cobertura, por su movimiento alternativo del espejo, describen un patrón de barrido sinusoidal sobre el terreno. Su velocidad no es constante y en su paso por la vertical va a máxima velocidad, resultando un espaciado transversal máximo (o densidad mínima), mientras que, en los extremos del barrido, el espejo se detiene para cambiar de sentido de giro y así el espaciado transversal es mínimo. La densidad en el eje puede llegar a ser un 40% inferior que en los extremos del barrido. Por ello, el modelo evolucionado ALS80, utilizado en la segunda cobertura, introdujo la disponibilidad de diferentes tipos de barrido de comportamiento más lineal que el sinusoidal habitual, como son el triangular, similar al sinusoidal pero más lineal y con un espaciado más uniforme, y el barrido llamado raster, que consigue gran linealidad y uniformidad a base de escanear sólo en una dirección mientras que en el barrido de retorno no se escanea, por lo que se reduce la frecuencia de escaneo efectiva a la mitad. Otros fabricantes como Riegl utilizan espejos oscilantes poligonales o giratorios que crean un patrón de exploración compuesto por líneas paralelas oblicuas a la dirección de vuelo. El sistema Optech Galaxy T2000, utilizado en el 100% del ámbito en la tercera cobertura, presenta un sistema de barrido lineal más moderno y homogéneo en cuanto a la densidad, gracias a su sistema FOV dinámico. Esto hace de la tercera cobertura una cobertura única debido a que se ha utilizado el mismo sensor para completarla.

Color nube de puntos (R,G,B,I): En caso de utilizar esta característica del producto PNOA es necesario conocer su significado. Para empezar, es importante reseñar que el color asignado a cada pulso es el que corresponde a su primer



retorno, asignado el mismo color al resto de resto de retornos del pulso. Por lo que salvo cuando el pulso es cenital y las coordenadas de todos los retornos son las mismas, la asignación del color en segundos y posteriores retornos no corresponde exactamente a ese punto pudiendo ser errónea.

Por otro lado, es necesario saber que en la primera cobertura primera cobertura, la ortofoto utilizada no era simultánea, se utilizaba la imagen disponible más cercana a la fecha del vuelo LiDAR del proyecto PNOA imagen, mientras que en la segunda y la tercera cobertura las ortofotos son simultáneas. En las dos primeras coberturas el formato LiDAR utilizado era el 1.2, por lo que el producto se entregó en dos series (RGB y IRC), mientras que la tercera cobertura está en formato LAZ 1.4 soportando directamente los cuatro canales (R.G.B.I).

4. Discusión

Durante los primeros años de implantación de la tecnología LiDAR en España se trabajaba, bien con vuelos específicos, o bien utilizando los vuelos de primera cobertura LiDAR PNOA en superficies relativamente pequeñas (RODRÍGUEZ et al., 2014), a escala monte, de manera que habitualmente los datos LiDAR PNOA utilizados en inventarios forestales pertenecían generalmente a un solo lote de vuelo.

En los últimos 10 años, la tecnología LiDAR se ha generalizado (GÓMEZ et al, 2019), se está trabajando en grandes escalas, combinando datos de distintos bloques de una misma cobertura con distintas características e incluso combinando datos de distintas coberturas para abordar trabajos con LiDAR multitemporal (PEÑA-MOLINA et al., 2024).

Tal como hemos analizado, el efecto de la fenología puede tener un enorme impacto en la representación estructural y la inferencia de modelos dasométricos de una misma masa de frondosas caducifolias dependiendo de si el vuelo es con o sin hoja. Es fundamental entender que en ningún caso los modelos desarrollados para caracterizar una masa basados en datos volados sin hoja serán adecuados para caracterizar una masa similar volada con hoja y viceversa. Sin embargo, tanto los datos recolectados con hoja como los datos recolectados sin ella son adecuados para una caracterización de una masa forestal por separado. De hecho, en el caso de disponer de dos vuelos de una misma zona, algunos autores sugieren que trabajar combinando ambos conjuntos de datos para el desarrollo de modelos forestales es la mejor solución (DAVISON, 2020).

De cara a trabajar con distintas coberturas va a ser imprescindible tener un adecuado conocimiento de las nubes de puntos. Hacer transferencia espacial o temporal de modelos de predicción de variables forestales es posible, siempre que trabaje con los estadísticos más estables entre vuelos (NAVARRO, 2017, NAVARRO et al, 2020).



La disponibilidad de datos abiertos tanto a través del LIDAR PNOA como a través de las parcelas de campo del Inventario Forestal Nacional (IFN), posicionadas con GPS submétrico a partir de la ejecución de la comunidad de Extremadura en el cuarto IFN, constituyen una enorme oportunidad para la monitorización de nuestros ecosistemas forestales, siempre teniendo en cuenta estas limitaciones en la transferencia de modelos entre vuelos (NAVARRO, 2019, TOMÉ et al., 2022).

Aprovechar las ventajas económicas que supone poder reutilizar datos de campo ya disponibles relacionados con un vuelo LiDAR es posible entre la primera y la segunda cobertura (NAVARRO 2019, DOMINGO et al 2020), lo que hace pensar que teniendo equivalentes precauciones, esa posibilidad será transferible a la tercera cobertura.

La densidad de puntos no parece influir determinadamente para obtener modelos predictivos por métodos de masa fidedignos con la realidad (GONZÁLEZ-FERREIRO et al., 2012), aunque definitivamente tiene impacto tanto para trabajar por métodos de árbol individual como para la transferencia de modelos de combustible de copas (MARINO et al, 2022).

La evolución tecnológica de las distintas coberturas del PNOA supone que la tercera cobertura tenga mejores características técnicas, tanto por densidad (5 pulsos/m²) como por sensibilidad vertical del retorno (1 m) para trabajar con métodos de árbol individual. Según HYYPÄ & INIKEN (1999), para una delineación exitosa de los árboles individuales se requieren densidades de puntos de 5-10 pulsos/m², sin embargo, posteriormente otros autores como VALBUENA en el 2013 y LATELLA y colaboradores en el 2021 han desarrollado métodos que dan buenos resultados a partir de 2 pulsos/m², lo que garantizaría poder aplicar esta aproximación de inventario LIDAR con los datos de la tercera cobertura.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que los errores en la generación del MDS y el MDE se propagarán directamente al MDAV (HOLLAUS et al., 2006). LECKIE et al., (2003) encontraron errores de hasta 0,5 m debidos al microrelieve y vegetación baja. Es de esperar que los errores obtenidos con vuelos más densos como los de la tercera cobertura sean menores. RETEBUCH y sus colaboradores (2003) encontraron que los errores generados a partir de datos de LiDAR de alta densidad eran por norma general menores inferiores a 0,3 m. La reducción de las fuentes de error en los modelos digitales de elevaciones del terreno generados a partir de la tercera cobertura debería traducirse en una mejor estimación la altura del dosel de las copas.

5. Conclusiones

Trabajar combinando distintos bloques de vuelo de cualquiera de las coberturas LiDAR PNOA o comparando datos de distintas coberturas LiDAR para seguimiento de masas forestales implica tener un conocimiento detallado de las particularidades de las citadas coberturas de cara a no caer en conclusiones erróneas derivadas de las distintas parametrizaciones de las mismas.



La fenología de las especies caducifolias tiene un impacto determinante en la estructura de la nube de puntos y, por tanto, en las estimaciones obtenidas. La utilización de datos procedentes de diferentes fases fenológicas (con o sin hoja) puede influir significativamente en las métricas derivadas y en la inferencia de variables dasométricas.

Por tanto, en cualquier trabajo realizado con más de un bloque de una cobertura será necesario consultar las fechas de las líneas de vuelo suministradas por parte del IGN de cara a detectar si hay posibles incongruencias fenológicas y tenerlo en cuenta a la hora de la interpretación de los resultados obtenidos.

Para garantizar la consistencia de las métricas LiDAR en masas caducifolias, desde el punto de vista forestal los vuelos deberían realizarse en fases fenológicas homogéneas. Se recomienda la fase “con hoja” entre junio y septiembre por su mayor estabilidad y viabilidad operativa, evitando las fases de transición

La disponibilidad de datos LiDAR PNOA abiertos y de parcelas georreferenciadas del IFN constituye una oportunidad única para la ciencia forestal española, siempre que se apliquen criterios de uso coherente y se profundice en la investigación sobre la transferibilidad de modelos.

El conocimiento profundo de las características de los datos de las distintas coberturas y la transferencia temporal y espacial de modelos entre vuelos van a desarrollar un papel fundamental a la hora de poner en valor todo el potencial de las tres coberturas. Profundizar la investigación en transferencia de modelos resulta prioritario para transferir el conocimiento generado a las empresas y administraciones que hoy día están trabajando de manera operativa con estos datos.

6. Bibliografía

- BALTSAVIAS, E.P. 1999. A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 54, 83-94.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3).
- COREN, F.; STERZAI, P. 2006. Radiometric Correction in Laser Scanning. Int. J. Remote Sens. 27, 3097–3104.
- CUASANTE, D.; GARCÍA, C.; 2009. Estimación de recursos forestales con tecnología LIDAR aerotransportada. Aplicación práctica en varios montes de la Provincia de Burgos. En: Actas del 5º CFE. Volumen 1. REF.: 5CFE01-544. S.E.C.F.; Junta de Castilla y León.
- DALPONTE M, FRIZZERA L, GIANELLE D. 2019. Individual tree crown delineation and tree species classification with hyperspectral and LiDAR data. PeerJ 6:e6227
<https://doi.org/10.7717/peerj.6227>.
- DAVISON, S.; DONOGHUE, D.; GALIATSATOS, N. 2020. The effect of leaf-on and leaf-off forest canopy conditions on LiDAR derived estimations of forest structural diversity. INT J APPL EARTH OBS. Volume 92. 102160, ISSN 1569-8432,
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102160>.
- DOMINGO, D.; ALONSO, R.; LAMELAS, M.T.; MONTEALEGRE, A.L.; RODRÍGUEZ, F.; DE LA RIVA, J. 2019. Temporal Transferability of Pine Forest Attributes Modeling Using Low-Density Airborne Laser Scanning Data. Remote Sens. 11, 261.
<https://doi.org/10.3390/rs11030261>.
- GARRIDO-SÁENZ DE TEJADA, J.M., GUTIÉRREZ-RICO, B., FERNÁNDEZ-RENAU



- GONZÁLEZ-ANLEO, A. 2022. PNOA-LiDAR 3ª cobertura. En Teledetección para una Agricultura Sostenible en la era del Big Data, Actas del XIX Congreso AET, pp. 181-184. 2022, Pamplona.
- GÓMEZ, C., ALEJANDRO, P., HERMOSILLA, T., MONTES, F., PASCUAL, C., RUIZ, L. A., ÁLVAREZ-TABOADA, F., TANASE, M., & VALBUENA, R. 2019. Remote sensing for the Spanish forests in the 21st century: a review of advances, needs, and opportunities. *Forest Systems*, 28(1), eR001. <https://doi.org/10.5424/fs/2019281-14221>.
- GONZÁLEZ-FERREIRO, E., DIÉGUEZ-ARANDA, U., MIRANDA, D., 2012. Estimation of stand variables in *Pinus radiata* D. Don plantations using different LiDAR pulse densities. *Forestry*, 85, 281–292. <https://doi.org/10.1093/forestry/cps002>.
- GUADA, G.; GARCÍA GONZÁLEZ, I.; PÉREZ-DE-LIS, G.; VÁZQUEZ-RUIZ, R. A. & MONTSERRAT-MARTÍ, G. 2018. Dry matter content during extension of twigs, buds and leaves reflects hydraulic status related to earlywood vessel development in *Quercus pyrenaica* Willd. *Eur. J. For. Res.*. DOI 10.1007/s10342-018-1104-5.
- HÖFLE, B; PFEIFER, N. 2007. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, Volume 62, Issue 6.
- HOLLAUS, M.; WAGNER, W.; EBERHÖFER, C.; KAREL, W. 2006. Accuracy of Large-Scale Canopy Heights Derived from LiDAR Data under Operational Constraints in a Complex Alpine Environment. *ISPRS.*, 60, 323–338.
- HSU, W.-C.; SHIH, P.T.-Y.; CHANG, H.-C.; LIU, J.-K. A. 2015. Study on Factors Affecting Airborne LiDAR Penetration. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 2015, 26, 241.
- HYYPÄ, J.; INKINEN, M., 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *PJF.*, 16, pp 27-42.
- LATELLA, M.; SOLA, F.; CAMPOREALE, C. 2021. A Density-Based Algorithm for the Detection of Individual Trees from LiDAR Data. *Remote Sens.* , 13, 322. <https://doi.org/10.3390/rs13020322>.
- LECKIE DG, GOUGEON FA, WALSWORTH N, PARADINE D. 2003. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sens Environ* 85: 355–369. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00013-0).
- LÓPEZ LEIVA, C.; ESPINOSA RINCÓN, J. Y BENGEOA MTZ. DE MANDOJANA, J. 2009. Mapa de vegetación de Castilla y León. Síntesis 1:400.000. Junta de Castilla y León. Consejería de Medio Ambiente.
- MARINO, E.; TOMÉ, J.L.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; MADRIGAL, J. 2022. Transferability of Airborne LiDAR Data for Canopy Fuel Mapping: Effect of Pulse Density and Model Formulation. *Fire*, 5, 126. <https://doi.org/10.3390/fire5050126>.
- ITECO, 2021. Cuarto Inventario Forestal Nacional . Castilla y León (2021). Área de Inventario y Estadísticas Forestales. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).
- NÆSSET, E., 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sens. Environ.* 80, 88–99. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00290-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00290-5).
- NAVARRO, J.A. 2019. Aplicaciones de la fotogrametría digital aérea en el inventario forestal. Universidad Politécnica de Madrid. 152 pp.
- NAVARRO, J.A.; TOMÉ, J.L.; MARINO, E.; GUILLÉN-CLIMENT, M.L.; FERNÁNDEZ-LANDA, ALFREDO. 2020. Assessing the transferability of airborne laser scanning and digital aerial photogrammetry derived growing stock volume models. *INT J APPL EARTH OBS*, Volume 91, 102135, ISSN 0303-2434.
- PEÑA-MOLINA, E., MOYA, D., TOMÉ, J. L., MARINO, E., FAJARDO-CANTOS, Á., GONZÁLEZ-ROMERO, J., BOTELLA-BOU, R., DÍAZ-MONTERO, A., LUCAS-BORJA, M. E., & DE LAS HERAS, J. 2024. Postfire damage zoning with open low -density LiDAR



- data sources in semi-arid forests of the Iberian Peninsula. *REMOTE SENS APPL*, 33, 101114. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2023.101114>.
- SOUTO HERRERO, M.; GARCÍA GONZÁLEZ, I. & DÍAZ VIZCAÍNO, E. 2005. Estudio fenológico de *Quercus pyrenaica* Willd. Y comparación con otros *Quercus* en las sierras orientales de Galicia: apertura de yemas y su relación con factores climáticos. 4º CFE (Zaragoza).
- REUTEBUCH, S. E., MCGAUGHEY, R. J., ANDERSEN, H. E., & CARSON, W. W. 2003. Accuracy of a high-resolution LiDAR terrain model under a conifer forest canopy. *Can. J. Remote Sens.*, 29(5), 527–535. <https://doi.org/10.5589/m03-022>.
- RODRIGUEZ, F.; FERNANDEZ-LANDA, A.; TOME, J. 2014. Resultados y reflexiones tras cinco años de inventario forestal con tecnología LiDAR. *Foresta* 61: 28-33.
- TOMÉ-MORÁN, J.L., MARTÍN-ALCÓN, S.; TORAÑO, A.; OLIVAR, J.; UHL, E.; NAVARRO, J.A.; PRETZSCH, H. 2022. Inventario por transferencia de modelos LiDAR a nubes de puntos fotogramétricas en masas de píceas en Traunstein Alemania. *Actas del XIX Congreso AET: Teledetección para una agricultura sostenible en la era del big data*, pp. 185-188. 2022, Pamplona.
- VAIN, A., YU, X., KAASALAINEN, S. & HYYPPÄ, J. 2010. Correcting airborne laser scanning intensity data for automatic gain control effect. *IEEE Geosci. Remote Sens.*, Vol. 7, No. 3 (July 2010), pp. 511-514. ISSN 1545-598X.
- VALBUENA, M. A.; 2013. Determinación de variables forestales de masa y de árboles individuales mediante delineación de copas a partir de datos LIDAR Aerotransportado. Aplicación a las masas de *Pinus sylvestris* L. en Álava. Tesis doctoral. Universidad de La Rioja. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
- WANG, X., PAN, H., GUO, K., YANG, X., & LUO, S. 2020. The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 502(1), 012008.
- WEHR, A. & LOHR, U. 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* Vol. 54, Issues 2-3, 68-82.