



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1944

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

Organiza





Cuantificación de la biomasa aérea en un bosque semiárido con LiDAR terrestre

GARCÍA GINÉS, A. (1), PÉREZ ROMERO, J. (1), ARNAL ROIG, L. (1), LARA GOMEZ, M.A. (2), BLANCO CANO, L. (1), DEL CAMPO GARCÍA, A.D. (1)

(1) Universitat Politècnica de València. ETS Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Dep. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente. ReForest.

(2) Centro de Investigaciones Aplicadas al Desarrollo Agroforestal.

Resumen

La cuantificación de la biomasa en ecosistemas forestales es fundamental para comprender el papel de los bosques como sumideros de CO₂. En este estudio centrado en parcelas experimentales del Monte de La Vallesa (Valencia, España) donde la especie dominante es el *Pinus halepensis*, se empleó la tecnología LiDAR terrestre para desarrollar una metodología robusta que abarque los componentes de la biomasa a nivel de árbol individual, utilizando el software Computree. El flujo de trabajo incluye la individualización de los árboles y la generación de Modelos Estructurales Cuantitativos (QSM), los cuales facilitan la estimación precisa de la biomasa almacenada. La validación de los modelos alométricos mostró correlaciones muy altas ($R^2 = 0.9978$), con un sobrestimado mínimo (~1%). No obstante, al validar la biomasa total del tronco se observó una correlación elevada ($R^2 = 0.9097$) entre ecuaciones alométricas y volúmenes derivados de LiDAR. Lo que indica la necesidad de filtros más precisos y ajustes paramétricas en la reconstrucción. Estos resultados demuestran la alta precisión y fiabilidad del enfoque basado en LiDAR terrestre.

Palabras clave

Alométricas, Computree, modelos de estructura cuantitativa, SimpleForest, teledetección.

Introducción

La silvicultura se enfrenta al desafío de lograr una gestión multifuncional de los ecosistemas forestales, que no solo optimice la producción de madera, sino que también asegure la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, como la mitigación del cambio climático (FAO, 2020) y la prevención de incendios. Además, las políticas ambientales emergentes y la demanda en el mercado de créditos de carbono acentúan la necesidad de comprender la dinámica del carbono (ORELLANA et al., 2012). En este contexto, la cuantificación precisa de la biomasa cobra especial relevancia (IPCC, 2006).

No obstante, los métodos tradicionales de inventario forestal presentan algunas limitaciones importantes, principalmente en ecosistemas complejos y estratificados, entendidos como aquellos bosques que exhiben múltiples estratos de vegetación (desde el dosel hasta el sotobosque), cada uno con condiciones ambientales particulares y comunidades de especies diferenciadas. Estas deficiencias provocan la necesidad de buscar herramientas más avanzadas como es la teledetección. En este sentido, la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) en sus versiones aéreas (Airborne Laser Scanning, ALS) y terrestres (Terrestrial Laser Scanning, TLS) ha demostrado ser de gran utilidad para la estimación de la biomasa. A diferencia de los sensores pasivos, el LiDAR es un sensor activo que no depende de luz solar, posibilitando su uso en diferentes condiciones ambientales (HUDAK et al., 2008). Por tanto, la adopción de estas tecnologías en el ámbito forestal ayuda a mejorar la eficiencia en la recolección de datos y reduce el coste asociado con los métodos tradicionales de inventario. Dentro de las opciones de este sensor, el TLS destaca por su capacidad para



generar mediciones tridimensionales de alta resolución, lo que permite caracterizar con mayor detalle la estructura forestal y, en consecuencia, estimar la biomasa con mayor precisión (CALDERS et al., 2015). Este enfoque resulta útil en bosques semiáridos, donde la heterogeneidad de especies y estructuras del dosel dificulta el uso de funciones alométricas convencionales (TANAGO et al., 2017). Además, facilita el estudio de la relación entre cobertura forestal y el ciclo hidrológico, aspecto determinante para la planificación de cuencas y la conservación de los recursos hídricos (BOSCH & HEWLETT, 1982). Asimismo, la generación de tarifas de cubicación a partir de variables dendrométricas aporta herramientas para equilibrar el aprovechamiento maderero, la conservación de la biodiversidad y la regulación de los procesos hidrológicos (VANCLAY, 1994). El presente trabajo analiza el potencial de la tecnología LiDAR terrestre para optimizar la cuantificación de la biomasa a nivel de árbol individual. El flujo de trabajo propuesto se aplicará en ecosistemas semiáridos, empleando ecuaciones alométricas para el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) y datos LiDAR procesados con el programa Computree. Finalmente, se compararán los resultados con estudios previos realizados en otras regiones para contextualizar los avances conseguidos y explorar las oportunidades futuras hacia una gestión forestal más sostenible.

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología que permita estimar la biomasa aérea, a nivel de árbol individual, a partir del empleo de datos LiDAR terrestre (TLS) y de ecuaciones alométricas. Para ello, se propone un flujo de trabajo que integre tanto la individualización de árboles y la generación de QSM (Modelo de Estructura Cuantitativa) en un único proceso, facilitando el análisis detallado de la estructura arbórea y la consiguiente estimación de la biomasa. Esta metodología se enmarca dentro del proyecto SALAM-MED, financiado por PRIMA (Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area). Entre los objetivos de este proyecto se encuentra la creación de Living Labs, es decir, talleres con actores del territorio para identificar nuevas oportunidades de gestión y desarrollo local. En estos espacios colaborativos, surgió la necesidad de cuantificar la biomasa como un servicio ecosistémico clave para la toma de decisiones orientadas a una gestión sostenible el territorio.

Además, se llevará a cabo la validación de la biomasa aérea a nivel de árbol individual. Para ello, se compararán los diámetros a la altura del pecho (DAP) obtenidos de datos LiDAR con los medidos en inventario, utilizando ecuaciones alométricas para estimar la biomasa. De forma similar, se contrastará la biomasa total del tronco calculada a partir de volúmenes derivados de datos LiDAR y la densidad de la madera, con la biomasa estimada mediante alométricas. Por último, se evaluará la viabilidad y precisión del programa y la idoneidad de la tecnología LiDAR para la estimación de la biomasa.

Metodología

Zona de estudio

Para definir estas estrategias, se establecieron parcelas experimentales de 50x50 m² en el monte de la Vallesa, situado en el Parque Natural del Turia (Valencia). El clima es mediterráneo con una marcada sequía estival, la precipitación anual es de 394.14 ± 102.79 mm y la temperatura media anual es de 16.62 ± 1.59 °C. La vegetación dominante es una masa arbórea compuesta principalmente por *Pinus halepensis* Mill., con una fracción de cubierta del 74%, una altura media de 10,27 ± 2,50 m, un diámetro a la altura del pecho (DAP) medio de 21,93 ± 8,18 cm y un área basimétrica por árbol media de 0,04 ± 0,03 m² (véase Figura 1) (BLANCO

etal., 2022).



Figura 1. Estado de la vegetación en la zona de estudio, La Vallesa, Valencia (España)

Levantamiento LiDAR

El 25 de mayo de 2022, la empresa IDAF (Centro de Investigaciones Aplicadas al Desarrollo Agroforestal) llevó a cabo un levantamiento mediante LiDAR terrestre en la zona de estudio, utilizando un total de 36 posicionamientos, es decir, puntos fijos donde se instaló el escáner, con el propósito de obtener una cobertura completa mediante un escaneo múltiple. Este procedimiento generó 4 archivos de nubes de puntos, en formato estándar LAS, organizados según las agrupaciones longitudinales delimitadas por corchetes azules (véase Figura 2).

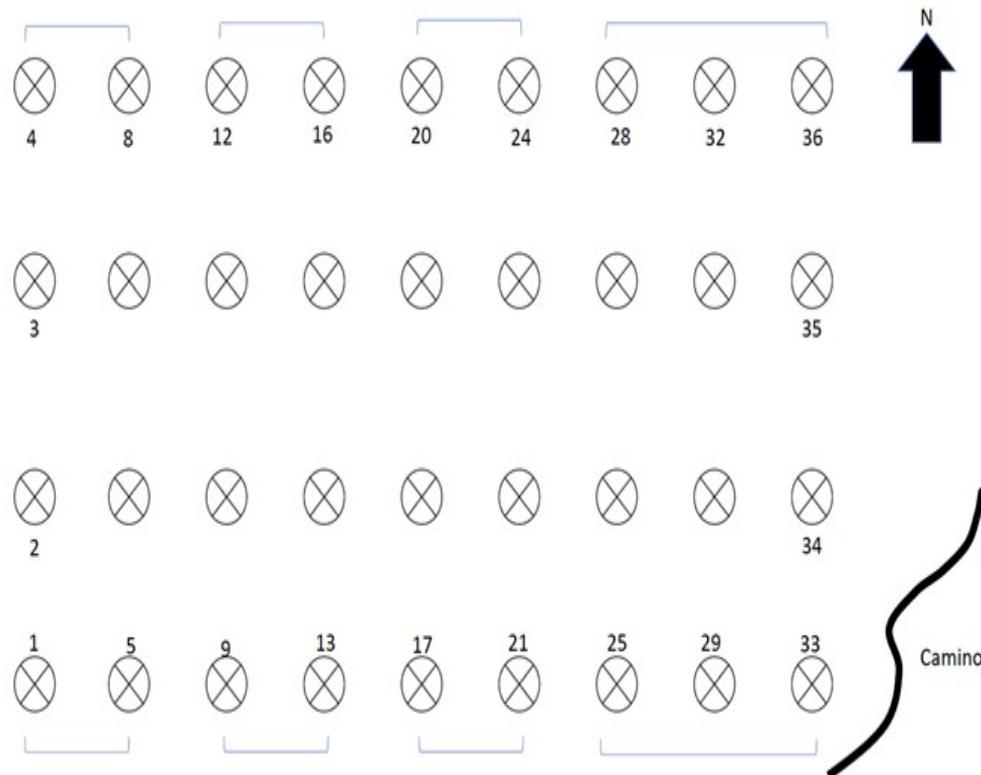


Figura 2. Distribución de los posicionamientos del LiDAR terrestre (distancia entre escaneos de 12 m)

Se empleó un escáner BLK360 y el registro de los diferentes escaneos individuales se realizó con el software Cyclone Register 360. Para fusionar las distintas nubes de puntos, se empleó la detección automática de 6 dianas reflectantes distribuidas de forma que aparecieran en los escaneos adyacentes. Una vez registradas las nubes de puntos, se evaluó la calidad del registro considerando el error medio entre ambas nubes. El registro fue aprobado cuando el error medio de los puntos en las nubes no superó los 6 mm, umbral que asegura la precisión y fiabilidad del modelo para los fines previstos. Los informes realizados por la empresa detallan la validación de la parte que se solapan las nubes de puntos (véase Tabla 1).

Tabla 1. Elementos importantes para la validación de los solapamientos entre nubes de puntos

ELEMENTOS DE CALIDAD	DESCRIPCIÓN	RESULTADOS (MEDIA ± DESVIACIÓN)
Nº de posicionamientos		9±2
Nº de enlaces entre estacionamientos		12±4.8
Calidad del registro	Errores cometidos entre los diferentes estacionamientos	<ul style="list-style-type: none"> • % de solapamiento existente entre las diferentes nubes de puntos generadas. • Error de conjunto (m) • % Fuerza <ul style="list-style-type: none"> • Solapamiento = 28% ± 6.7 • Error de conjunto = 0.014 m ± 0.002 • Fuerza = 68.5 % ± 22.3
Error de diana (m)		0.012 m ± 0.003
Error nube a nube (m)		0.016 m ± 0.002

El uso del escaneo múltiple implica realizar un diseño previo en la distribución de los posicionamientos para lograr una cobertura más completa del área de estudio, minimizando las oclusiones causadas por la vegetación (CALDERS et al., 2015). Este enfoque previene la ausencia de datos en áreas situadas detrás de elementos que interfieren en la trayectoria del láser.

Dividir la nube de puntos LiDAR en archivos separados ofrece varias ventajas frente al procesamiento de un único archivo con la nube completa de toda la parcela (CORSO, 2012):

- Facilita el manejo y procesamiento de los datos, especialmente si se trabaja con recursos computacionales limitados.
- Facilita el procesamiento paralelo permitiendo procesar simultáneamente diferentes archivos.
- Mejora la visualización de la parcela, sobre todo si se trata de masas relativamente densas.

Análisis y procesamiento de la información TLS

Para procesar y visualizar las nubes de puntos obtenidas mediante LiDAR terrestre (TLS), se ha optado por la plataforma de código abierto Computree, diseñada para el procesamiento de datos tridimensionales en aplicaciones forestales. Su arquitectura se basa en un núcleo central que gestiona los pasos algorítmicos y permite la integración de plugins independientes, como SimpleForest (HACKENBERG et al., 2021), utilizado en este trabajo. Estos plugins aportan funcionalidades adicionales y pasos algorítmicos específicos para el análisis forestal tridimensional.

La interfaz de Computree se compone de tres ventanas principales que facilitan la definición del flujo de trabajo, el ajuste de parámetros en función de las características del área de estudio y la especie, así como la visualización de los resultados intermedios y finales.

El plugin SimpleForest permite generar QSM (Modelos de Estructura Cuantitativa) a partir de las nubes de puntos de cada árbol. Estos modelos posibilitan realizar un



análisis detallado de la estructura arbórea (HACKENBERG et al., 2021).

La combinación de Computree y SimpleForest ofrece una herramienta potente para el procesamiento y análisis de datos tridimensionales en el ámbito forestal, brindando opciones avanzadas de visualización y exportación de la información generada para su análisis en otros softwares. Sin embargo, al utilizar estas herramientas, se debe considerar una serie de aspectos técnicos y computacionales que mejoren el procesamiento y la precisión de los resultados.

Fase 1: individualización de árboles

El flujo de trabajo se ha dividido en dos fases, la primera corresponde a la individualización de los árboles, donde hay que tener en cuenta los siguientes criterios, integrados en el flujo de trabajo establecido en el programa:

- **Filtrado de puntos:** es crucial eliminar los puntos considerados como “ruido” (por ejemplo, suelo y sotobosque) que no forman parte de la estructura real del árbol.
- **Ajuste de parámetros:** la calibración de los parámetros debe ajustarse a las características específicas de la masa forestal estudiada.
- **Definición de copas:** hay que prestar especial atención a la delimitación de las copas, concretamente en aquellas áreas donde se entrelazan, evitando duplicaciones u omisiones.
- **Generación de Modelos Digitales:** estos modelos son fundamentales para normalizar las alturas, identificar las copas y calcular otros parámetros como la altura dominante o la fracción de cabida cubierta (FCC). Los tres modelos principales son el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), que representa la superficie del terreno sin ningún elemento, el Modelo Digital de Superficies (MDS), que incluye la elevación de elementos sobre la superficie terrestre, y el Modelo Digital de Altura de la Vegetación (MDHV) que representa la altura de la vegetación sobre el suelo y se obtiene mediante la diferencia entre MDS y MDE.

Computree no tiene ninguna función específica que genere el MDS ni MDHV, sino que éstos van implícitos en diferentes fases del procesado. La estructura vertical de los árboles se modela durante el proceso de obtención de los QSM, lo que implícitamente proporciona información equivalente al MDS y MDHV.

- **Normalización de alturas:** se obtiene mediante la diferencia entre la elevación del terreno y la elevación absoluta de cada punto. Este aspecto es crucial para obtener alturas precisas de los árboles y su estructura vertical, además facilita la comparación de los árboles en terrenos diferentes.
- **Consideración de la estructura forestal:** la complejidad de la estructura forestal puede influir negativamente a la precisión de la detección. Por lo que se recomienda utilizar algoritmos que puedan segmentar a diferentes niveles y ajustar los parámetros de detección según las características específicas del bosque.
- **Tamaño de las celdas:** el tamaño de celda debe ajustarse para equilibrar el nivel de detalle, la densidad y la eficiencia computacional. Celdas más pequeñas ofrecen un mayor detalle, pero requieren de más puntos y tiempo de procesamiento, mientras que celdas más grandes reducen ruido y suavizan la representación a costa de perder detalles finos.

Fase 2: generación de QSM

Una vez se han individualizado los árboles, se generan los QSM para cada árbol. Se debe considerar los siguientes aspectos y funciones clave implicadas en la generación de cilindros que componen el QSM:

- **Calidad de la individualización de los árboles:** asegurar una correcta



- segmentación de árboles individuales para garantizar QSM precisos.
- **Algoritmo SphereFollowing:** este es crucial para la reconstrucción de la estructura arbórea mediante la aproximación de la geometría del árbol con cilindros. Partiendo de un punto en la base del tronco, se extienden “esferas” a lo largo de la estructura del árbol. En cada iteración, la esfera se ajusta a la densidad de puntos en la nube para determinar la dirección y el radio del cilindro que mejor representa esta sección.
- **Filtrado:** el propósito es suavizar la nube de puntos y reducir los puntos ruido, eliminando valores atípicos que puedan afectar a la reconstrucción.
- **Correcciones alométricas:** el modelo QSM se ajusta para reflejar relaciones biológicas conocidas entre las dimensiones de las ramas y el tronco, basadas en principios alométricos.
- **Ensamblaje y refinamiento del modelo:** los cilindros generados se ensamblan para formar una representación coherente del árbol completo, respetando la topología, es decir, cómo se conectan las ramas entre sí y con el tronco.
- **Calidad de los QSM:** verificar que los cilindros generados se ajusten adecuadamente a la estructura real del árbol, evitando la influencia de puntos “ruido” que puedan sobredimensionar el modelo del árbol.

La generación de los QSM facilita la estimación de la biomasa y otras propiedades estructurales de los árboles. No obstante, esta precisión varía según el árbol estudiado, dependiendo de la densidad de ramificaciones y de follaje, además de la existencia de matorral o la proximidad entre árboles. Por lo que, se ha tenido que realizar diversos ajustes paramétricos en el programa para eliminar todos estos elementos que no pertenecen a la estructura real del árbol.

Computree permite exportar los resultados en diferentes formatos, para nuestro caso se recomienda exportarlos en formato Excel. De toda la información que proporciona, estos son los importantes que debemos identificar para calcular la biomasa:

- **ID de los árboles:** la identificación de los árboles se ha establecido según el nombre del archivo original, es decir, los 4 archivos proporcionados están identificados según el primer punto de estacionamiento y el último.
- **Orden de ramas:** es una clasificación jerárquica de cilindros que establece el programa según el orden de ramificación y que sirve identificar los diferentes estratos que componen la estructura arbórea. El orden establecido empieza por el orden 0 correspondiente a todos aquellos cilindros generados y que representan el tronco principal; el siguiente orden 1 corresponde a los cilindros que representan las ramas principales; el orden 2 son las ramas secundarias; esta ordenación termina cuando ya no se detecta ninguna otra bifurcación, es decir, cuando ha llegado a generar los cilindros de las ramas más finas.
- **Volumen, radio y longitud:** estas variables geométricas se proporcionan para cada cilindro (QSM) del árbol, siendo útiles en la fase de validación y cálculo de la biomasa.

Validación de los QSM y cálculo de la biomasa

Para la validación de los resultados se utilizaron modelos alométricos que utilizan el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) como variable principal. La estimación del DAP de los árboles obtenidos a partir de los datos LiDAR, se realizó utilizando el radio del cilindro que corresponde a la altura de 1.30 m. Para ello, se sumaron las longitudes de cada cilindro desde la base del fuse principal hasta alcanzar dicha altura, determinando así el diámetro en el punto de medida estándar.



Posteriormente, se compararon los DAP de una muestra de 20 árboles de datos LiDAR con los DAP de 20 árboles del inventario de campo, con el propósito de identificar las equivalencias entre los árboles LiDAR y los medidos en campo. Para el cálculo de la biomasa aérea de los árboles LiDAR y del inventario, se empleó las siguientes ecuaciones alométricas:

- Alométricas que estiman la biomasa aérea (fuste y ramas) por separado y en conjunto. Las ecuaciones se sacaron de muestreos procedentes de diferentes áreas del mitad sureste y centro de España, destacando la región de Murcia, Comunidad Valenciana, Andalucía y Castilla-La Mancha para los pinares existentes en estas regiones, incluyendo el *Pinus halepensis*. (LÓPEZ-SERRANO et al., 2005).
- Alométricas que estiman la biomasa del fuste principal y de las ramas. Estas ecuaciones se han recogido del CREAM (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales) específicamente para el pino carrasco disponibles en la aplicación AllometrApp (<https://laboratoriforestal.creaf.cat/allometrapp/>).

Por otro lado, se comparó la biomasa derivada del volumen del tronco medido con datos LiDAR con la biomasa estimada mediante la ecuación alométrica para el tronco, de López-Serrano. Para ello, se utilizó una densidad de la madera de 0.57 g/cm^3 , determinada en laboratorio siguiendo la Norma TAPPI T 258 om-94. Este procedimiento implica saturar las muestras de madera con agua para simular su volumen en condiciones de máxima humedad, y luego emplear el método de desplazamiento de agua para calcular la densidad. En este método, se sumergen las muestras en un recipiente con agua, se mide la cantidad de agua desplazada al introducirlas y posteriormente se pesan. Las muestras se secan en un horno a aproximadamente 103°C durante al menos 72 horas, y se pesan diariamente hasta alcanzar un peso constante. A partir del cálculo de la densidad mediante el volumen, se obtiene la biomasa total del tronco utilizando los datos LiDAR (PINILLA et al., 2023).

Resultados

Resultados de la individualización y obtención de los QSMs de cada árbol

En las Figuras 3 y 4 se muestra la precisión del programa para individualizar cada árbol, evitando los puntos correspondientes de la vegetación arbustiva y troncos caídos, presentes en la zona de estudio.

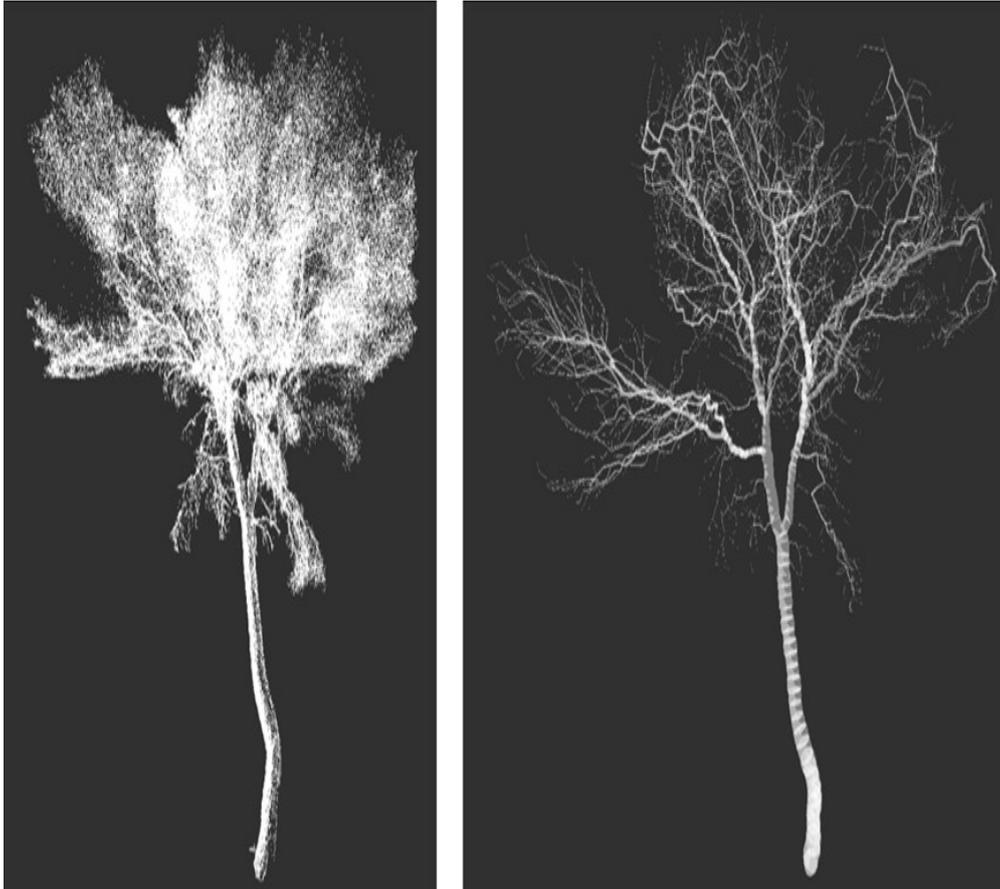


Figura 3. Resultados del QSM del Árbol con ID: 18_4 (izquierda: nube de puntos del árbol individualizado – derecha: QSM generado del árbol)

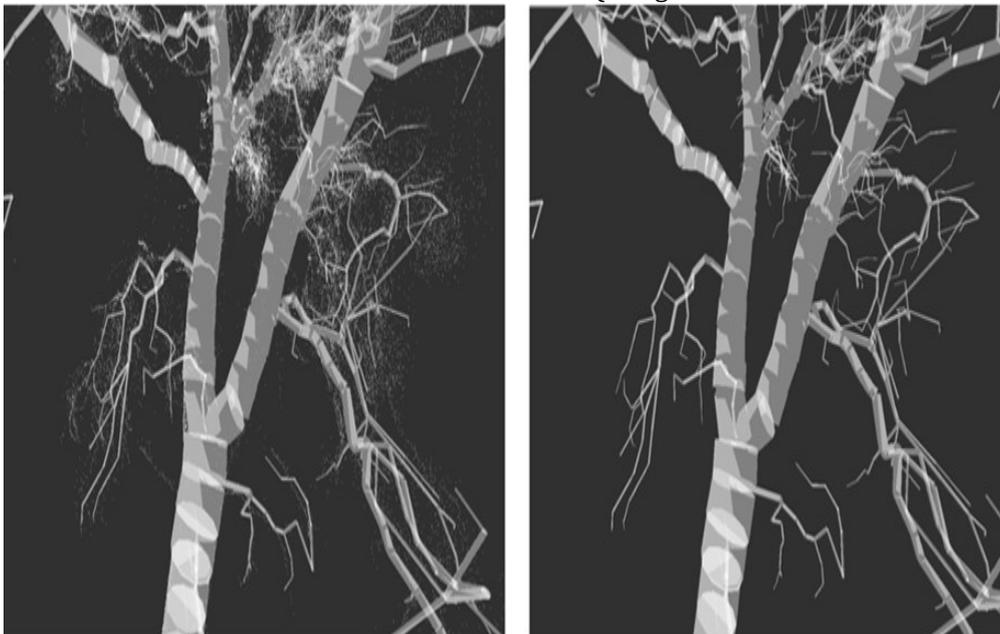


Figura 4. Aproximación de los QSM del Árbol con ID: 18_4 (izquierda: muestra de puntos ruido que se ha evitado en la generación del QSM - derecha: QSM sin puntos "ruido")

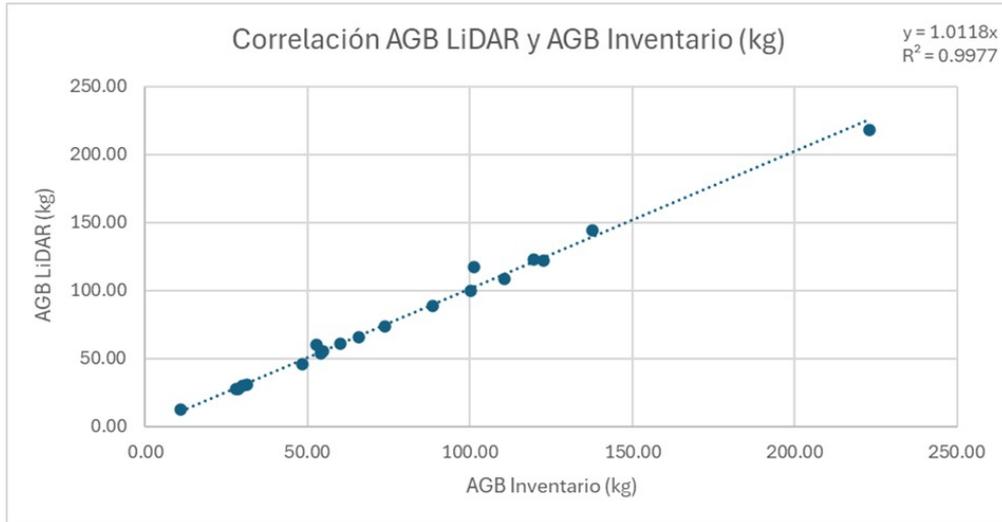
Resultados de las validaciones

En la Tabla 2 se muestra la comparación de los DAP obtenidos mediante los QSM a partir de datos LiDAR y los DAP medidos directamente en campo.

Tabla 2. Equivalencia entre Árbol LiDAR y Árbol Inventariado mediante la comparación del DAP (cm)

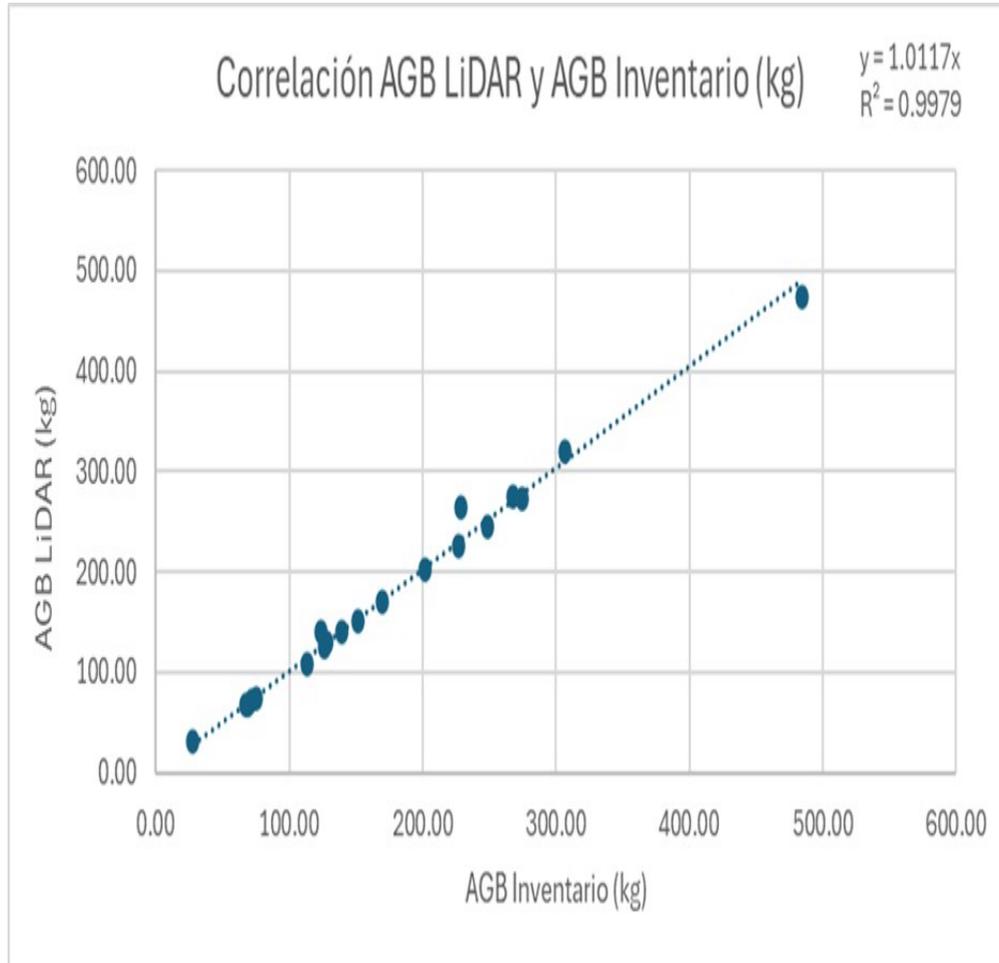
ID ÁRBOL LIDAR	DAPLiDAR (cm)	ID ÁRBOL INVENTARIADO	DAPINVENTARIO (cm)
18_1	36.5	131	36.2
18_2	20.4	140	20.5
18_3	23.1	67	23.1
18_4	27.3	15	27.1
18_5	28.2	184	28.5
916_1	24.9	46	24.9
916_2	26.3	33	28
916_3	15.4	166	15.4
916_4	20.3	50	20.3
916_5	10.5	160	11
1724_1	21.2	93	21.3
1724_2	20.1	72	21.2
1724_3	22.0	70	22
1724_4	29.9	100	30.5
2536_1	19.4	76	19
2536_2	26.2	28	26.2
2536_3	16.2	170	16.1
2536_4	15.9	85	15.9
2536_5	15.6	121	15.4
2536_6	28.5	181	28.4

A continuación, se muestra la biomasa aérea obtenida a partir de las alométricas del CREAM se muestra en la Gráfica 1.



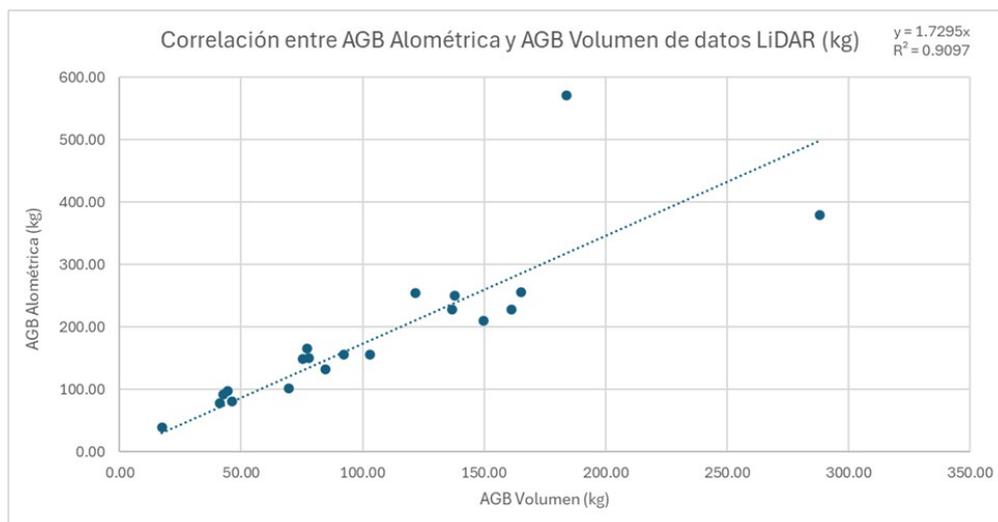
Gráfica 1. Correlación entre la biomasa aérea de datos LIDAR y la biomasa aérea de datos inventariados (kg)

La biomasa obtenida a partir de las alométricas de LÓPEZ-SERRANO (2005) se muestra en la Gráfica 2.



Gráfica 2. Correlación entre la biomasa aérea de datos LIDAR y la biomasa aérea de datos inventariados (kg)

Por último, la validación entre la biomasa obtenida de la alométrica de LÓPEZ-SERRANO (2005) para la parte del tronco y la biomasa obtenida del volumen total del tronco a partir de datos LiDAR se muestra en la siguiente Gráfica 3.



Gráfica 3. Correlación entre la biomasa aérea obtenida de alométrica y la biomasa aérea obtenida del volumen total del tronco a partir de datos LiDAR

Discusión

Comparación de los resultados

La validación de la biomasa aérea a través de ecuaciones alométricas, que se realizó utilizando los DAP obtenidos de datos LiDAR como de inventario. Al comparar los resultados de las alométricas basadas en estos DAP, se obtuvieron resultados que muestran correlaciones prácticamente idénticas para ambos modelos alométricos ($R^2 = 0.9977$ y 0.9979), con una pendiente ligeramente superior a 1 (alrededor de 1.01). Esto indica una sobreestimación mínima (alrededor del 1%) entre los valores estimados mediante los datos LiDAR y las mediciones en campo. Los resultados en cuanto a la biomasa obtenida también muestran estimaciones parecidas (AGB de datos LiDAR = 97.7 ± 58 kg; AGB del inventario = 99.5 ± 58.2 kg). Por tanto, las diferencias entre estas ecuaciones alométricas en son prácticamente despreciables, por lo que, cualquiera de ellas podría considerarse apropiado para los objetivos de este trabajo. No obstante, los resultados en la validación de la biomasa total del tronco, comparando estimaciones basadas en ecuaciones alométricas y volúmenes derivados de datos LiDAR, presentan una correlación elevada ($R^2 = 0.9097$). A pesar de esto, se observa un sobredimensionamiento en los volúmenes estimados, produciendo valores de biomasa casi duplicados en comparación con los cálculos alométricos. Al analizar diferentes ejemplares de árbol, se aprecia que la pendiente de la recta de ajuste y la dispersión de los puntos evidencian esta tendencia al sobreestimado.

Este exceso en el cálculo del volumen del tronco indica la necesidad de aplicar filtros más precisos en la nube de puntos y mejorar los ajustes paramétricos en la fase de reconstrucción, con el fin de evitar la generación de volúmenes inexistentes por parte del programa. Aunque este enfoque requiere de un mayor esfuerzo, resulta especialmente útil para obtener estimaciones detalladas y precisas de biomasa en áreas o parcelas reducidas.

Durante la elaboración del flujo de trabajo del programa se observó que un procesamiento en dos fases mejora el ajuste de los Modelos de Estructura Cuantitativa (QSM, por sus siglas en inglés). Esta estrategia se explica por la necesidad de ajustar parámetros específicos según la estructura de cada árbol, lo que se traduce en una mayor representación de cada compartimento (fuste y ramas).

Selección y diferencias en el uso de LiDAR aéreo y terrestre

El gran auge de estas tecnologías ha dado paso a una gran cantidad de estudios y trabajos que analizan la viabilidad de estas herramientas, aunque la elección entre el uso de LiDAR aéreo o terrestre depende de varios factores: objetivos del estudio, precisión en las estimaciones, presupuesto económico disponible, extensión de la superficie que se quiere estudiar y/o la estructura de la masa.

El LiDAR terrestre, a diferencia del LiDAR aéreo, es una herramienta capaz de capturar con más detalle el dosel y permite capturar elementos estructurales a menor escala, incluso en áreas con vegetación densa o terrenos irregulares. Esta capacidad de penetración en el dosel facilita el acceso a información precisa del sotobosque (WILKES et al., 2017).

En un estudio se analizó la penetrabilidad de estos sensores en los diferentes estratos verticales mediante el análisis de densidades de puntos dentro de vóxeles, los resultados fueron que el LiDAR terrestre genera mayores densidades de punto del sotobosque, fuste y partes inferiores del dosel, mientras que el LiDAR aéreo registra mayores densidades en partes elevadas, especialmente en el ápice (CRESPO et al., 2017).

Comparación de software para el procesamiento de nubes de puntos LiDAR

Este trabajo no se centra en el análisis exhaustivo de distintos programas, pero se realizó un estudio esquemático de viabilidad (Tabla 4) en el que se evalúan las ventajas y desventajas de distintos programas que permiten el procesamiento de nubes de puntos LIDAR. Para un estudio más completo se sugiere evaluar aspectos como la precisión en la individualización de árboles, eficiencia o disponibilidad de generar QSM, velocidad de procesamiento, facilidad de uso, compatibilidad con diferentes formatos de datos, coste económico y disponibilidad de actualizaciones.

Tabla 4. Estudio esquemático de viabilidad del programa Computree + SimpleForest

SOFTWARE	TIPO DE LICENCIA	FUNCIONALIDADES CLAVE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Código Abierto	- Generación de QSMs	- Exportación en diferentes formatos	- Flexibilidad	- Integración con otros softwares 3D
CloudCompare	Código Abierto	- Visualización	- Análisis de nubes de puntos	
Comercial	- Visualización		- Análisis de datos LiDAR	
Potree		Código Abierto		
Fusion		Comercial		
		Comercial		
3D Forest	Comercial		- Coste económico	
		Comercial		

Computree (y su plugin SimpleForest) se presenta como una solución viable para la individualización de los árboles y la generación de QSM, además de ser un software gratuito. Su desventaja reside en los conocimientos técnicos que requiere, dado que es preciso definir y ajustar parámetros según la especie, el tipo de masa forestal y las características topográficas de la zona de estudio.

Perspectivas futuras y consideraciones adicionales



El flujo de trabajo debe seguir perfeccionándose con el objetivo de lograr a estimar la biomasa total estratificada de una masa forestal, es decir, la biomasa arbórea (tronco, ramas, hojas y raíces) y del sotobosque. Además de mejorar los ajustes paramétricos para que el modelo se ajuste más a la estructura real del árbol, principalmente en las ramas, donde se ha observado sobredimensionados en el cálculo del volumen total del árbol.

Las siguientes ideas buscan reforzar la precisión y utilidad de la información LiDAR para la toma de decisiones en la gestión forestal, la valorización de los recursos madereros y la contribución a estrategias de mitigación del cambio climático.

- **Calibración y validación continua:** aumento del número de parcelas y mediciones de campo para abarcar mayor diversidad de condiciones (suelo, clima y especies); contraste periódico de las estimaciones LiDAR con mediciones en campo para corregir posibles desvíos (LIANG et al., 2016).
- **Optimización de parámetros en los QSM:** identificación de los parámetros críticos (umbrales, tamaños de voxel y filtrado) que más influyen en la reconstrucción del árbol; empleo de métodos de ajuste semi-automático para minimizar la subjetividad y asegurar una mayor consistencia en diferentes masas forestales (RAUMONEN et al., 2013).
- **Aplicaciones selvícolas:** diseño de tratamientos selvícolas o planes de prevención de incendios basados en datos de volumen y estructura vertical; identificación de daños, plagas o malformaciones en el arbolado mediante el análisis detallado de la nube de puntos (LIANG et al., 2016).

Un estudio de factibilidad técnico-económica de implementar LiDAR en una empresa forestal confirma que, pese a los retos en coste y procesamiento, esta tecnología ofrece ventajas operativas significativas, tales como una elevada precisión altimétrica, rapidez en la captura de datos y capacidad de generar modelos tridimensionales detallados del bosque. Además, la reducción de los costes en labores como el diseño de caminos, derivada de la mayor precisión y eficiencia del LiDAR, respalda su implementación al generar un retorno económica que favorece la adopción de esta tecnología en la práctica forestal (ALZAMORA et al., 2021).

Estas características son fundamentales ya que permiten planificar con exactitud medidas de manejo, diseñar planes de prevención de incendios basados en datos de volumen y estructura vertical y detectar con rapidez alteraciones en la masa forestal.

- **Aplicaciones hidrológicas:** el LiDAR ofrece nuevas posibilidades en el cartografiado de sistemas fluviales, al obtenerse información topográfica de alta resolución permitiendo ser utilizado en el análisis y estimación de variables hidrológicas y en el estudio de diferentes componentes del medio fluvial (MARTÍNEZ et al., 2009).
- **Uso complementario de otras tecnologías:** combinación del LiDAR con fotogrametría y sensores multiespectrales para mejorar la caracterización de la masa forestal (BOUDREAU et al., 2008).

Conclusiones

El procesamiento de datos LiDAR terrestre en dos fases ha demostrado ofrecer una representación más fiel de la estructura arbórea individual, logrando mejores ajustes en los QSM. Esta precisión se ve reflejada en la alta correlación ($R^2 > 0.9$) obtenida al comparar las estimaciones de biomasa con datos medidos en campo, confirmando la eficacia del TLS para aplicaciones que requieran gran exactitud a escala de árbol individual. No obstante, el enfoque en dos fases ha revelado



desafíos como el sobredimensionamiento del volumen total de algunos árboles debido a la formación excesiva de ramas en el modelado, esto subraya la necesidad de optimizar los procesos de filtrado de la nube de puntos y ajustar con mayor precisión los parámetros en la reconstrucción, con el propósito de evitar la generación de ramas inexistentes y mejorar la consistencia de los QSM.

El LiDAR terrestre se posiciona como la tecnología más adecuada cuando se requiere capturar con detalle el dosel, el sotobosque y la estructura interna del árbol, aspectos cruciales en la planificación de medidas de manejo. En contraste, el LiDAR aéreo es preferible para áreas extensas, aunque con menor resolución vertical. En cuanto a la elección del sensor LiDAR (ALS o TLS), deberá supeditarse a las necesidades concretas del proyecto, la escala de trabajo, la precisión deseada y el presupuesto disponible.

El software Computre (y su plugin SimpleForest), se presenta como una opción factible y de bajo coste para el procesamiento de nubes de puntos LiDAR terrestres, si bien implica un aprendizaje técnico que permita configurar adecuadamente los parámetros y lograr resultados coherentes.

Por último, el flujo de trabajo establecido se recomienda en estudios que requieran estimaciones muy detalladas de biomasa a nivel de árbol individual. No obstante, se sugiere continuar con investigaciones comparativas entre diferentes programas para poder evaluar la precisión, la eficiencia, la facilidad de uso y la compatibilidad con distintos formatos y aplicaciones forestales. De esta manera, se fortalecerá la fiabilidad de las herramientas LiDAR, permitiendo avanzar hacia una gestión forestal más precisa y sostenible.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto SALAM-MED, financiado por PRIMA (Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area), el cual ha permitido la realización de este estudio. También, agradecer a la empresa IDAF por su colaboración al brindarnos la orientación necesaria para aclarar la información sobre el levantamiento LiDAR realizado.

Bibliografía

- ALZAMORA, R.M.; BECKER, J.C.; ESCUDERO, M.; PINTO RODRÍGUEZ, A.A.; 2021. Factibilidad técnico-económica de implementar LiDAR en una empresa forestal. *Madera y Bosques*, 27(2), e2721661. Verano 2021. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2721661>
- BLANCO, L.; MOLINA, A. J.; GONZÁLEZ, M. C.; PÉREZ, J.; LIDÓN, A. L.; DALMAU, F.; QUINTO, F.; GORGONIO, E.; PASTOR, E.; DEL CAMPO, A. D.; 2022. GUARDIAN: Sistema de Gestión contra Incendios Forestales para la Prevención y Defensa de la Interfaz Urbano-Forestal Mediterránea. En *Sociedad Española de Ciencias Forestales* (Ed.). 8 Congreso Forestal Español (CFE). Lleida 27 Jun-1Jul,2022.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D.; 1982. A Review of Catchment Experiments to Determine the Effect of Vegetation Changes on Water Yield and Evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55(1), 3-23. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2)
- BOUDREAU, J.; NELSON, R.; MARGOLIS, H.; BEAUDOIN, A.; GUINDON, L.; KIMES, D.; 2008. Regional Aboveground Forest Biomass using Airborne and Spaceborne LiDAR in Québec. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3876-3890. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.003>
- CALDERS, K.; NEWHAM, G.; BURT, A.; MURPHY, S.; RAUMONEN, P.; MARTIN HEROLD; DARIUS CULVENOR; VALERIO AVITABILE; MATHIAS DISNEY; JOHN ARMSTON; MIKKO KAASALAINEN; 2015. Nondestructive Estimates of Above-



- Ground Biomass using Terrestrial Laser Scanning. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(2), 198-208. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12301>
- CRESPO-PEREMARCH, P.; RUIZ, L.A.; 2017. Análisis comparativo del potencial del ALS y TLS en la caracterización estructural de la masa forestal basado en voxelización. En: *Nuevas plataformas y sensores de teledetección. XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Eds. Luis A. Ruiz, Javier Estornell, Manuel Erena). pp 131-135. Murcia 3-7 octubre 2017.
- CORSO, J. M.; 2012. Procesos de Segmentación de Nubes de Puntos. <http://hdl.handle.net/2117/16969>
- FAO; 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome.
- HACKENBERG, H., KIM, C., DERMOL, M., RAUMONEN, P., PIBOULE, A., MATHIAS, D. (2021). SimpleForest—A comprehensive tool for 3d reconstruction of trees from forest plot point clouds. <https://doi.org/10.1101/2021.07.29.454344>
- HUDAK, A. T.; CROOKSTON, N. L.; EVANS, J. S.; HALL, D. E.; FALKOWSKI, M. J.; 2008. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2232-2245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.009>
- HUDAK, A.; STRAND, E.; VIERLING, LEE.; BYRNE, J.; EITEL, J.; MARTINUZZI, S.; FALKOWSKI, M.; 2012. Quantifying Aboveground Forest Carbon Pools and Fluxes from repeat LiDAR surveys. *Remote Sensing of Environment*, 123, 25-40. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.023>
- IPCC; 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agricultura, Forestry and Other Land Use*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- LIANG, X.; KANKARE, V.; HYPPÄ, J.; WANG, Y.; KUKKO, A.; HAGGRÉN, H.; KAARTINEN, H.; JAAKKOLA, A.; GUAN, F.; HOLOPAINEN, M.; VASTARANTA, M.; 2016. Terrestrial Laser Scanning in Forest Inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- LÓPEZ-SERRANO, F. R.; GARCÍA-MOROTE, A.; ANDRÉS-ABELLÁN, M.; TENDERO, A.; DEL CERRO, A.; 2005. Site and Weather Effects in Allometries: A Simple Approach to Climate Change Effect on Pines. *Forest Ecology and Management*, 215(1), 251-270. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.014>
- MARTÍNEZ, R.; MERINO, S.; MAGDALENO, F.; 2009. Aplicaciones de la teledetección láser (LiDAR) en hidrología forestal y en la gestión de ecosistemas fluviales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 29, 23-27.
- MONTERO, G.; CAÑELLAS, I.; RUIZ-PEINADO, R.; 2001. Growth and Yield Models for *Pinus halepensis* Mill. *Forest Systems*, 10(1), 179-201. <https://doi.org/10.5424/720>
- NAVARRO, R.; DUQUE, J.; RODRÍGUEZ, C.; VARO, M. A.; PALACIOS, G.; 2018. Airborne Laser Scanning Cartography of On-Site Carbon Stocks as a Basis for the Silviculture of *Pinus halepensis* Plantations. *Remote Sensing*, 10(10), 1660. <https://doi.org/10.3390/rs10101660>
- ORELLANA, G. G.; SANDOVAL, M. L.; GLADYS, G.; CALDERÓN, N. E. G.; TAMARIZ, J. V.; 2012. Descripción de la Dinámica de Carbono en Suelos Forestales mediante un Modelo de Reservorios. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 3(1): 123-135.
- PINILLA SUÁREZ, J.; NAVARRETE ULLOA, F.; LUENGO VERGARA, K.; NAVARRETE TORRES, M.; 2023. Modelos de estimación de la densidad básica de la madera de *Acacia dealbata* y *A. mearnsii* espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR). *Ciencia & Investigación Forestal*, 29(2). Agosto 2023. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.576>
- RAUMONEN, P.; KAASALAINEN, M.; AKERBLUM, M.; KAASALAINEN, S.;



- KAARTINEN, H.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M.; DISNEY, M.; LEWIS, P.; 2013. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing*, 5(2), 491-520. <https://doi.org/10.3390/rs5020491>
- TANAGO, J. G. D.; LAU, Á.; BARTHOLOMEUS, H.; GOODMAN, R. C.; DISNEY, M.; MANURI, S.; BURT, A.; CALDERS, K.; 2017. Estimation of Above-Ground Biomass of Large Tropical Trees with Terrestrial LiDAR. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(2), 223-234. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12904>
- VANCLAY, J.; 1994. *Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests*. CAB International. Wallingford, UK.
- WILKES, P.; DISNEY, M.; VICARI, M. B.; CALDERS, K.; & BURT, A.; 2018. Estimating urban above ground biomass with multi-scale LiDAR. *Carbon Balance and Management*, 13(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0098-0>
- WILKES, P.; LAU, A.; DISNEY, M.; CALDERS, K.; BURT, A.; GONZÁLEZ, J.; BARTHOLOMEUS, H.; BREDE, B.; HEROLD, M.; 2017. Data Acquisition Considerations for Terrestrial Laser Scanning of Forest Plots. *Remote Sensing of Environment*, 196, 140-153. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.030>