



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Estimación no destructiva de la biomasa de copa en árboles extramaduros mediante escaneado láser terrestre

MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M.¹, SCHNEIDER, R.², MADRIGAL, G.¹, DEL RÍO, M.¹ y CALAMA, R.¹

¹ Departamento de Dinámica y Gestión Forestal. CIFOR. INIA-CSIC. Crta. La Coruña km 7,5. 28040 Madrid.
(menendez.maría@inia.es)

² Departamento de Biología, Química y Geografía. Universidad de Quebec a Rimouski. 300 Allée des Ursulines, Rimouski. QC G5L 3A1 Canadá.

Resumen

La cubicación y determinación de biomasa en pie en árboles extramaduros y de gran tamaño es esencial debido al gran valor y singularidad de estos ejemplares, en los que, con frecuencia, no es posible obtener autorización para realizar un estudio de su biomasa basado en métodos destructivos. En los últimos años, el uso de tecnologías avanzadas en el mundo forestal, especialmente tecnologías de sensores remotos como pueden ser los escaneados con láser terrestre (TLS) o el aéreo (LiDAR aerotransportado), ha proporcionado una herramienta alternativa para la estimación de manera sencilla y precisa de la biomasa forestal, tanto a nivel individual como de masa.

Se ha realizado un escaneado con láser terrestre en varios ejemplares de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*. El trabajo con las nubes de puntos y la individualización posterior de cada ejemplar, su copa y fuste, han permitido evaluar diferentes metodologías para la estimación de la biomasa de copa que, en la mayoría de los casos es la más complicada y costosa de realizar en un muestreo destructivo en campo. Posteriormente se ha comparado la capacidad de predicción de la biomasa observada con el valor real obtenido en un muestreo destructivo posterior.

Palabras clave

Árbol monumental, método no invasivo, TLS, LiDAR, *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*.

1. Introducción

En las últimas décadas se ha incrementado el interés en la estimación de las reservas de carbono de los bosques como consecuencia de su papel en la captura y almacenamiento de CO₂ atmosférico. Los requisitos de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) se están actualizando continuamente en las Conferencias de las Partes (COP) y los últimos cambios significativos se introdujeron en la COP21 (París). Todos estos acuerdos, hacen necesaria la cuantificación de las existencias de carbono en la biomasa arbórea y algunas investigaciones ya se han centrado en obtener información precisa sobre la disponibilidad de nutrientes en los diferentes componentes de la biomasa (VEJPUSTKOVÁ et al., 2015). La determinación de las existencias y flujos de carbono es esencial para comprender el estado actual y futuro de los bosques en el contexto del ciclo global de carbono en respuesta a los cambios en los usos de la tierra y las condiciones climáticas (POUDEL & TEMESGEN, 2016).

Los bosques envejecidos son sumideros de carbono, pero no están protegidos por tratados internacionales ya que, tradicionalmente se ha pensado que con la edad los bosques dejan de acumular C. Otros estudios (LITVAK et al., 2003; BOND-LAMBERTY et al., 2004; CAMPBELL et al., 2004) concluyeron que el secuestro de carbono por los bosques generalmente disminuye después de un pico a mediada edad, y se ha demostrado que la reducción del crecimiento de árboles “viejos” es uno de los principales contribuyentes a esta disminución. Sin embargo, LUYSSAERT et al. (2008) afirman que entre los 15 y 800 años la productividad neta de los ecosistemas (el balance neto de C

del bosque incluyendo el suelo) es generalmente positiva. Sus resultados demuestran que los bosques envejecidos continúan acumulando C. El crecimiento en edades avanzadas frecuentemente se subestima, incluso en condiciones de estado estacionario. No obstante, los cambios ambientales pueden contribuir a la persistencia o aumento del crecimiento de árboles viejos (Pretzsch, 2020). Para la mayoría de las especies, la tasa de crecimiento masivo aumenta continuamente con el tamaño del árbol (STEPHENSON et al., 2014; FORRESTER et al., 2020; PRETZSCH, 2020). Por lo tanto, los árboles grandes y viejos no actúan simplemente como depósitos de carbono senescente, sino que fijan activamente grandes cantidades de carbono en comparación con los árboles más pequeños; en el extremo, STEPHENSON et al. (2014) afirmaron para especies tropicales y templadas, que un solo árbol grande puede significar la misma cantidad de carbono para el bosque en un año que la que contiene un árbol completo de tamaño mediano. En las zonas templadas y boreales del hemisferio norte, este tipo de bosques secuestran aproximadamente $1,3 \pm 0,5$ giga toneladas de C al año. Esto implica que el 15% de la superficie forestal mundial proporciona al menos el 10% de la productividad neta global de los ecosistemas, lo que no se consideró en las compensaciones por la creciente concentración de CO₂ atmosférico. Los bosques maduros acumulan C durante siglos y contienen grandes cantidades del mismo. Pero, si se perturban estos bosques, una parte importante de ese C volverá a la atmósfera.

La biomasa total aérea afecta al ciclo de carbono, la acumulación de combustible leñoso, la asignación de nutrientes del suelo o el hábitat de la vida silvestre (LU, 2005). La distribución de la biomasa en las diferentes fracciones depende de la especie, la ubicación geográfica, la edad, el tamaño del árbol, la densidad de la masa o las prácticas de manejo (JENKINS et al., 2003; PAJTÍK et al., 2008; POORTER et al., 2012; TUMWEBAZE et al. 2013; YANG et al., 2019). En rodales relativamente abiertos y con baja área basal, la localización de la biomasa puede depender más del mayor desarrollo de follaje para maximizar la absorción de luz. Por el contrario, en rodales densos en los que hay menos espacio para expandir las copas o los sistemas radicales son más finos, puede ser que la mayor cantidad de biomasa se encuentre en los fustes para crecer más altos y mantener así una posición competitiva dentro del dosel (POORTER et al., 2012).

Tradicionalmente, la biomasa aérea se ha estimado a partir de modelos alométricos que relacionan variables fácilmente medibles en campo, como la altura total (*h*) o el diámetro normal (*d*), con las diferentes fracciones de la biomasa del árbol, o a nivel de rodal, utilizando modelos similares para todas las fracciones evaluadas (BRAVO et al., 2011; FORRESTER et al., 2017; JANSONS et al., 2017; MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ et al., 2013; RUIZ-PEINADO, et al., 2011, 2012; USOLTSEV et al., 2018; WANG et al., 2018). Para construir estos modelos alométricos es necesario realizar un muestreo de campo que incluya: (1) cortar árboles en pie, (2) separar el árbol en las diferentes fracciones que lo constituyen y (3) pesar individualmente cada fracción. Aunque el muestreo destructivo se propuso como el método más preciso para la estimación de biomasa (WEISKITTEL et al., 2015), requiere mucho tiempo y es muy costoso. Además, este tipo de muestreo puede ser muy problemático cuando se centra en árboles monumentales, que representan las clases de tamaño más grandes de una especie determinada (WEISKITTEL et al., 2015), aunque el muestreo de dichos ejemplares es muy necesario para ajustar modelos precisos que permitan mejorar su aplicabilidad.

Se han desarrollado nuevas metodologías que incluyen métodos de ajuste novedosos y otros procesos de adquisición de datos en campo, para mejorar las estimaciones de biomasa de los árboles (DAHLHAUSEN et al., 2017; EKER et al., 2017; MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ et al., 2021; POUDEL & TEMESGEN, 2016; ZHOU & HEMSTROM, 2009). En los últimos años, se han centrado muchos estudios en técnicas de estimación de biomasa que no se basan en un muestreo destructivo, sino mediante el uso de nuevas tecnologías como datos procedentes de escaneo con láser terrestre (TLS) o aéreo (LiDAR) (METZ et al., 2013; DISNEY et al., 2018; STOPELL et al., 2018). Estas metodologías requieren una muestra independiente de árboles cortados para calibrar los modelos y un preprocesamiento y análisis de datos complicado que ralentiza el desarrollo del modelo. Sin embargo,

estas técnicas también permiten realizar una caracterización estructural de los sistemas forestales, estudiar la geometría de los árboles y extender los resultados de cada árbol individual al rodal (DASSOT et al., 2011), información que posteriormente se puede incorporar a los modelos. En España, la información sobre la aplicación de TLS se limita a unos pocos estudios (FERNÁNDEZ-SARRÍA et al., 2013; UZQUIANO-PÉREZ, 2014, 2021; BARBEITO et al., 2017; MOLINA-VALERO et al., 2019). Otra posibilidad podría ser estimar el volumen de los árboles en pie mediante metodologías tradicionales o imágenes estereoscópicas hemisféricas (RODRÍGUEZ-GARCÍA et al., 2014); posteriormente se transformaría este volumen en biomasa utilizando BEF (Biomass Expansion Factor) o BECF (Biomass Expansion and Conversion Factors).

A pesar del creciente número de modelos de biomasa a nivel de árbol junto con los esfuerzos para ajustar modelos de biomasa generalizados que mejoren la aplicabilidad en diferentes áreas (DEMIGUEL et al., 2014; FORRESTER et al., 2017; CORREIA et al., 2018), la estimación de biomasa en ejemplares de grandes dimensiones aún no es sencilla y, en algunos casos, puede presentar una gran incertidumbre. Tras examinar la aplicabilidad de los modelos de biomasa publicados en España, se identificaron ciertos problemas en las estimaciones de algunas fracciones de la biomasa arbórea. Por lo tanto, se podrían producir importantes desviaciones en las estimaciones de biomasa para árboles de diámetros fuera del rango de ajuste de las mismas. Estos problemas aumentan cuando los árboles objeto de estudio son árboles extramaduros o de grandes dimensiones como consecuencia de su edad o de sus condiciones de crecimiento y desarrollo.

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es estudiar y combinar nuevas metodologías como el escaneado láser terrestre para la estimación de biomasa de copa en ejemplares de grandes dimensiones y extramaduros. Este objetivo general se concreta en dos objetivos específicos que son: mejorar los modelos de la biomasa en árboles de grandes dimensiones, y comprender mejor el crecimiento y comportamiento de los árboles extramaduros en nuestros bosques.

3. Metodología

3.1 Mediciones en campo

Se seleccionaron 12 ejemplares de *Pinus pinaster* en la provincia de Valladolid y 15 de *Pinus halepensis* en la Comunidad de Madrid, que posteriormente iban a ser cortados siguiendo el Plan de Ordenación de cada uno de los montes. Todos los árboles seleccionados debían cumplir la premisa de presentar un diámetro normal igual o superior a los 40 cm y se tomaron sus coordenadas GPS para su localización inequívoca. Además, se midieron el diámetro en la base del árbol (*d_tocon*, cm), el diámetro normal (*d*, cm), la altura total (*h*, m) y dos diámetros de copa perpendiculares entre sí (*d_copa*, m).

Cada uno de los árboles seleccionados se ha escaneado de forma individual desde al menos cuatro puntos diferentes alrededor del mismo, con un escáner terrestre Faro Focus 3D montado sobre un trípode a una altura de 1,3 m. La Tabla 1 muestra los parámetros de ajuste empleados en el escaneo. Para realizar el co-registro de los escaneos de cada una de las posiciones, se utilizaron 6 esferas de plástico de 15 cm de diámetro colocadas en unas estacas de madera a diferentes alturas. El tiempo total de escaneo por cada árbol fue de aproximadamente 20 minutos.

Tabla 1. Parámetros de ajuste utilizados para el escaneo de los árboles.

Resolución angular (mm)	1,534	Calidad	2x
Campo visión horizontal	0° - 360°	Campo visión vertical	-60° - 90°
Tamaño escaneo (Ptos)	10240 x 4267	Distancia de puntos	6,1 mm / 10 m

Duración escaneo (min)	5
------------------------	---

Una vez que los árboles estaban escaneados, se procedió al apeo de los mismos, separando en las diferentes fracciones: fuste, ramas de diámetro superior a 7 cm, ramas de diámetro entre 2 y 7 cm, ramales o ramas de diámetro inferior a 2 cm. Cada una de estas fracciones fue pesada en campo y se llevó una muestra a laboratorio para su secado. Para mayor información sobre la metodología, consultar MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ et al. (2013) o RUIZ-PEINADO al. (2011, 2012).

3.2 Procesado de datos

La visualización y alineación de la nube de puntos 3D tomadas en campo se realizó con el programa Faro Scene 2021.2.0 (Faro Technologies Inc., Lake Marry, USA). Posteriormente se realizó el registro de las nubes de puntos para establecer la posición relativa de los diferentes escaneos en el momento de la toma de datos. Las nubes de puntos así obtenidas contienen ruido procedente de muy diversos orígenes, como puede ser matorral, suelo, personas, etc. Una vez que el registro se completó con un error de reemplazamiento aceptable, se eliminó la mayor parte de ese ruido mediante la individualización de cada uno de los árboles objeto de estudio y la posterior limpieza manual de la nube de puntos.

Una vez individualizados cada uno de los árboles, se tomaron en primer lugar mediciones de las mismas variables dasométricas que se habían medido en campo: diámetro normal (d), altura total (h), diámetro de copa (d_{copa}), altura de copa (h_{copa}). A continuación se segmentó cada nube de puntos de árbol completo en 2 fracciones: fuste y copa. Con las fracciones establecidas, se probaron dos metodologías de aproximación para la estimación de la biomasa. En este documento se muestra únicamente las aproximaciones realizadas en la fracción de copa. Aplicando la primera metodología, se estimó el volumen de copa dividiendo la nube de puntos en secciones de 2 cm de espesor y cada 10 cm a lo largo del eje vertical de la misma. Se aplicó una triangulación a todos los puntos considerados en el mismo plano horizontal y se calculó el área de la sección (Figura 1). Este proceso se repitió cada 10 cm de altura de la copa. El volumen total se estimó como la suma de todos los volúmenes entre dos secciones consecutivas, de acuerdo con la metodología propuesta por FERNÁNDEZ-SARRÍA et al. (2013). En la segunda metodología, se estimó el volumen a partir de figuras geométricas. La nube de puntos de la fracción de copa se asimiló a una esfera y se estimó su volumen. Ambas estimaciones de volumen se comparan con el volumen real estimado mediante la medición de la copa.

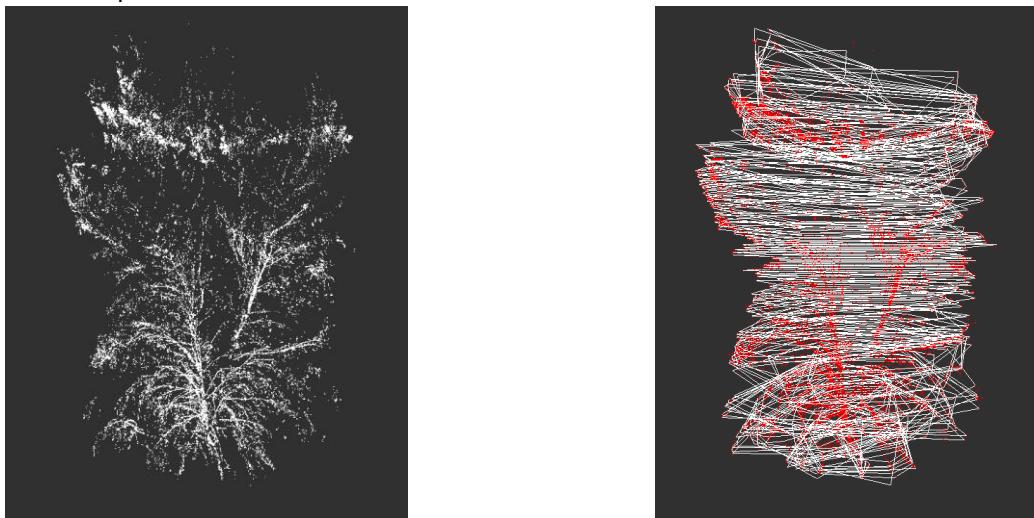


Figura 1. Representación de la nube de puntos de la copa (izquierda) y la nube de puntos con la triangulación y las diferentes secciones establecidas cada 10 cm (derecha) en uno de los ejemplares estudiados (en rojo pueden verse los puntos correspondientes a la nube).

3.3 Estimación de la biomasa real

Las muestras de las diferentes fracciones de biomasa tomadas en campo se secaron en estufa a 102 °C hasta peso constante, lo que permitiría obtener el peso seco final de la muestra y conocer la humedad de la misma. Este valor de biomasa real será el que podremos comparar con la estimación obtenida de las nubes de puntos. A continuación se presenta una descripción de las dimensiones de los árboles muestreados así como de las fracciones de biomasa de cada especie (Tabla 2). Los valores de biomasa indicados corresponden a peso seco, una vez corregido por el porcentaje de humedad.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos (máximo, mínimo y media) de las principales variables de los árboles muestreados en las dos especies estudiadas.

		N	d	h	B _f	B ₇	B ₂₇	B ₂
<i>Pinus halepensis</i>	Media		49,74	24,88	1498,07	228,29	159,17	256,12
	Mínimo	15	39,75	19,20	376,75	39,04	28,04	105,63
	Máximo		64,00	30,60	9595,24	537,33	305,79	549,29
<i>Pinus pinaster</i>	Media		67,53	16,51	878,11	285,61	998,57	557,03
	Mínimo	12	61,50	13,40	672,49	136,98	729,87	259,82
	Máximo		76,00	20,30	1113,66	441,90	1360,40	897,70

Nota. d es el diámetro normal (cm), h es la altura total (m), B_f es la biomasa de fuste (kg), B₇ es la biomasa de ramas de diámetro >7 cm (kg), B₂₇ es la biomasa de ramas de diámetro entre 2 y 7 cm (kg), B₂ es la biomasa de ramas de diámetro <2 cm (kg).

3.3. Modelización

Tras el análisis de las predicciones de volumen de copa en las dos metodologías propuestas, se procedió a la modelización de la biomasa real obtenida en el muestreo en campo junto con dicho volumen resultante del estudio de la nube de puntos. En una primera aproximación, se probó el ajuste de un modelo lineal (Ec. 1) para la predicción de la biomasa de copa a partir del volumen estimado con la nube de puntos obtenida mediante TLS. El ajuste de dichos modelos se realizó con el procedimiento SAS/ETS® MODEL (SAS Institute Inc., 2004). El análisis gráfico de los residuos y los estadísticos de bondad de ajuste REMC (raíz del error medio cuadrático) y R²_{adj} (coeficiente de determinación ajustado), permitieron la evaluación del comportamiento de los modelos ajustados.

$$b_{\text{copa}} = \beta_0 + \beta_1 \cdot v_{\text{copa}} \quad (1)$$

donde b_{copa} es la biomasa real de copa (kg), v_{copa} es el volumen de copa (m³) estimado a partir de la segmentación de la nube de puntos, β_i son los parámetros del modelo.

4. Resultados

La Tabla 3 muestra los volúmenes obtenidos para la fracción de biomasa de copa en los 28 ejemplares estudiados y obtenidos a partir de las dos metodologías previamente explicadas, pudiendo observarse diferencias bastante considerables en las estimaciones volumétricas de ambas metodologías. Como consecuencia de ello, se decidió modelizar únicamente la biomasa real de la copa en función de la estimación volumétrica obtenida con la metodología de las secciones. Los parámetros y estadísticos de bondad de ajuste se muestran en la Tabla 4, tanto para *P. halepensis* como para *P. pinaster*. Como puede observarse en la Tabla 4, hubo 4 ejemplares de *P. halepensis* en los que no se pudo realizar la metodología geométrica en los mismos.

Tabla 3. Volúmenes de copa obtenidos (m^3) con las 2 metodologías.

Especie	Árbol	Geométrico	Secciones
<i>Pinus halepensis</i>	1	343,74	47,43
	2	584,09	39,44
	3	358,73	43,44
	4	1467,47	34,92
	5	333,53	40,73
	6	360,90	24,02
	7	1167,43	62,23
	8	437,74	19,60
	9	200,17	6,39
	10	278,37	11,26
	11	4706,28	6,43
	12	-	7,76
	13	-	3,36
	14	-	5,97
	15	-	12,88
<i>Pinus pinaster</i>	1	398,95	50,31
	2	405,53	24,46
	3	370,56	47,75
	4	149,01	25,27
	5	139,52	15,90
	6	140,78	22,14
	7	274,99	26,25
	8	276,22	25,70
	9	299,41	42,20
	10	777,96	56,12
	11	349,76	35,85
	12	439,82	31,41
	13	322,09	25,24

Tabla 2. Estimación y error estándar de los parámetros, raíz del error medio cuadrático (REMC) y coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) del modelo de biomasa para *P. halepensis* y *P. pinaster*.

Especie	Parámetro	REMC	R^2_{adj}	
<i>Pinus halepensis</i>	β_0	$74,4609 \pm 56,9573$	133,19	0,7378
	β_1	$12,8110 \pm 2,0898^{***}$		
<i>Pinus pinaster</i>	β_0	$1202,5746 \pm 144,3406^{***}$	162,33	0,6551
	β_1	$18,5049 \pm 3,9546$		

Nota. Nivel de significación: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. β_j son los parámetros estimados mediante el ajuste.

Los modelos obtenidos, tanto para *P. halepensis* como para *P. pinaster*, mostraron una buena capacidad de ajuste para la variabilidad de la muestra, siendo capaces de explicar más del 65% de dicha variabilidad, con errores que oscilaron entre 133 y 162 kg. La Figura 2 muestra los valores predichos de biomasa frente a los residuos para la dos especies modelizadas, *P. halepensis* (Figura 2A) y *P. pinaster* (2B).

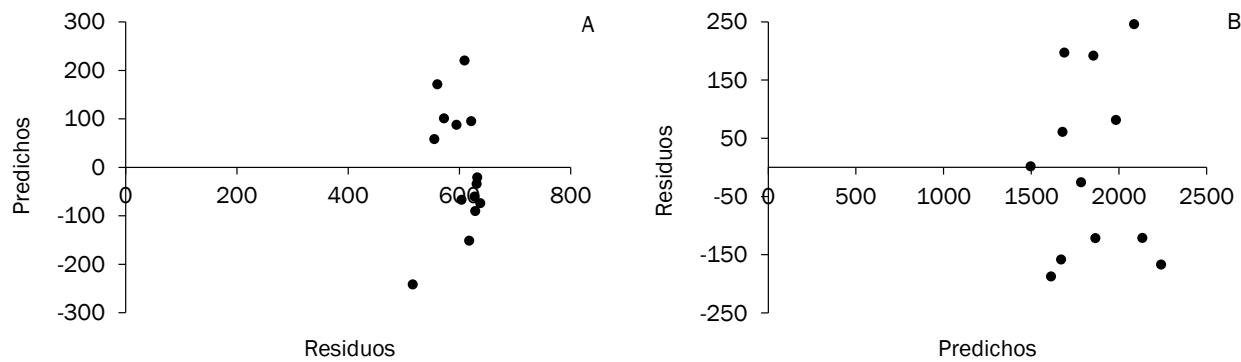


Figura 2. Valores predichos frente a residuos de los modelos de biomasa ajustados para *P. halepensis* (2A) y *P. pinaster* (2B).

5. Discusión

El desarrollo de modelos alométricos de biomasa ha sido hasta ahora una tarea basada en los muestreos destructivos que consumen mucho tiempo y dinero. En el caso de los ejemplares de grandes dimensiones, este muestreo es si cabe más complicado ya que, en muchos casos, son ejemplares protegidos que no se pueden cortar, pero de gran relevancia para las buenas predicciones de los modelos ajustados (CHAVE et al., 2005, 2014). El rápido desarrollo de aplicaciones de escaneado láser terrestre en selvicultura y en particular los métodos de reconstrucción de árboles proporcionarán conjuntos de datos de referencia de tamaño y representatividad espacial para la calibración de dichos modelos alométricos. Los árboles de grandes dimensiones pueden verse como particularmente difíciles de reconstruir a partir de datos TLS debido a la habitual complejidad de las formas de los fustes y a una mayor nivel de oclusión en las copas de los árboles (TAKOUDJOU et al., 2017).

En este estudio, se han realizado muestreos destructivos en ejemplares de *P. halepensis* y *P. pinaster* de grandes dimensiones que han permitido obtener una primera aproximación lineal para la estimación de la biomasa de la fracción de copa a partir del conocimiento de su volumen obtenido de una nube de puntos tras un escaneo con TLS. Se han escaneado 15 *P. halepensis* en una masa cerrada de elevada densidad y 13 *P. pinaster* en una masa más abierta y con menor densidad, de tal forma que la configuración de las copas era completamente diferente en cada una de las especies estudiadas. Esta metodología muestra una alternativa real a las aproximaciones a través de los muestreos destructivos, sin una pérdida significativa de precisión. Aporta también un valor muy significativo y es que permite realizar mediciones en una etapa posterior, entrando en juego la escala multi temporal para realizar comparaciones o el seguimiento preciso de patrones de crecimiento, plasticidad de la copa, interacciones con vecinos, etc. (HOSOI et al., 2013; KAASALAINEN et al., 2014; ROCHON, 2014).

Los resultados de estimación volumétrica obtenidos a partir de figuras geométricas mostraron grandes diferencias frente a la estimación a partir de secciones equidistantes. Se debe tener en cuenta que la metodología de figuras geométricas incluye los huecos internos de la copa y los espacios externos entre las ramas, generando por lo tanto una clara sobreestimación del volumen aparente de la fracción de copa. La gran variabilidad en la forma de la copa de las especies estudiadas y de cada uno de los ejemplares hace que la asimilación de la fracción de copa a una esfera quizás no sea la forma geométrica que mejor se ajuste a dicho volumen, al igual que ocurre en otros casos con los métodos basados en la sombra de la proyección geométrica (METZ et al., 2013). La asimilación a una esfera considera todos los elementos de la copa escaneada, sin embargo puede considerarse un objeto 3D primitivo al que asimilar dicha fracción del árbol (MOORTHY et al., 2011) y

no ajustarse a la realizada del mismo. Las ventajas de la aplicación del escaneado TLS pueden verse reducida en este tipo de ejemplares de grandes dimensiones debido a las peculiaridades que presentan.

Por el contrario, el método de las secciones, a partir del cual el volumen total de la copa se divide en secciones equidistantes presenta una mejor aproximación del volumen de la copa a cada altura, teniendo en cuenta menos espacios vacíos en la parte exterior de las ramas de la copa, de manera similar a los resultados obtenidos por FERNÁNDEZ-SARRÍA et al. (2013). La precisión obtenida en los modelos desarrollados depende en gran parte de la correcta identificación y posterior tratamiento de la nube de puntos, teniendo en cuenta la dificultad de captura durante el escaneo de las ramas de pequeñas dimensiones dentro de copas de gran volumen (TAKOUDJOU et al., 2017). De hecho, el signo del parámetro B1 obtenido en *P. halepensis* haría indicar que cuanto mayor fuera la

6. Conclusiones

Esta primera aproximación muestra la posibilidad de la utilización del TLS para la construcción de ecuaciones de biomasa similares a las obtenidas de los muestreos destructivos. Se ha realizado una segmentación manual de la nube de puntos que ha implicado mucho tiempo de procesado, pero se han obtenido resultados muy interesantes, con modelos que son capaces de explicar más del 65% de la variabilidad total de la muestra. Las grandes dimensiones y peculiaridades que presentan los ejemplares de grandes dimensiones o extramaduros y, especialmente sus copas, dificultan la generalización de criterios de segmentación pero es una línea de investigación en la que se pueden llevar a cabo importantes mejoras tanto en las especies de este estudio como en el resto de especies forestales.

7. Agradecimientos

Agradecemos a los revisores por sus útiles comentarios para mejorar el artículo. Este estudio no hubiera sido posible sin la colaboración de los Servicios Forestales de las diferentes Comunidades Autónomas que han ayudado en la localización de las áreas de estudio y la solicitud de permisos de corta.

8. Bibliografía

BARBEITO, I.; DASSOT, M.; BAYER, D.; COLLET, C.; DRÖSSLER, L; LÖF, M.; DEL RÍO, M.; RUIZ-PEINADO, R.; FORRESTER, D.I.; BRAVO-OVIEDO, A.; PRETZSCH, H. 2017. Terrestrial laser scanning reveals differences in crown structure of *Fagus sylvatica* in mixed vs. pure European forests. *For Ecol Manage* 405: 381 - 390.

BOND-LAMBERTY, B.; WANG, C.; GOWER, S.T. 2004. Net primary production and net ecosystem production of a boreal black spruce wildfire chronosequence. *Global Ch Biol* 10: 473 - 487.

BRAVO, F.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; DEL RÍO, M.; ET AL. 2011. Growth and yield models in Spain: Historical overview, Contemporary Examples and perspectives. *For Syst* 20: 315.

CAMPBELL, J.L.; SUN, O.J.; LAW, B.E. 2004. Disturbance and net ecosystem production across three climatically distinct forest landscapes. *Global Biochem Cycles* 18, GB4017.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIMS, M.A.; CHAMBERS, J.Q.; EAMUS, D., FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, L.-P.; NELSON, B.W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; JAMAKURA, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 87 – 99.

CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, M.S.; DELITTI, W.B.C.; ...; VIEILLENT, G. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Change Biol.* 20: 3177 – 3190.

CORREIA, A.C.; FAIAS, S.P.; RUIZ-PEINADO, R.; CHIANUCCI, F.; CUTINI, A.; FONTES, L.; MANETTI, M.C.; MONTERO, G.; SOARES, P.; TOMÉ, M. 2018. Generalized biomass equations for Stone pine (*Pinus pinea* L.) across the Mediterranean basin. *For Ecol Manage* 429: 425 - 436.

DALHAUSEN, J.; UHL, E.; HEYM, M.; BIBER, P.; VENTURA, M.; PANZACCHI, P.; TONON, G.; HORNÁTH, T.; PRETZSCH, H. 2017. Stand density sensitive biomass functions for young oak trees at four different European sites. *Trees - Struct Funct* 31: 1811 – 1826.

DASSOT, C.F. 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Ann For Sci* 68(5): 959 - 974.

DE MIGUEL, S.; PUKKALA, T.; ASSAF, N.; SHATER, Z. 2014. Intra-specific differences in allometric equations for aboveground biomass of Eastern Mediterranean *Pinus brutia*. *Ann. For. Sci.* 71: 101 – 112.

DISNEY, M.I.; BONI VICARI, M.; BURT, A., CALDERS, K.; LEWIS, S.L.; RAUMONEN, P.; WILKES, P. 2018. Weighing trees with lasers: Advances, challenges and opportunities. *Interface Focus* 8:1 – 14.

EKER, M.; POUDEL, K.P.; ÖZÇELIK, R. 2017. Aboveground biomass equations for small trees of brutian pine in Turkey to facilitate harvesting and management. *Forests* 8(12): 477 - 492.

FERNÁNDEZ-SARRÍA, A.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; SAJDAK, M.; MARTÍNEZ, L.; ESTORNELL, J. 2013. Residual biomass calculation from individual tree architecture using terrestrial laser scanner and ground-level measurements. *Comput Electron Agric* 93: 90 - 97.

FORRESTER, D.I.; TACHAUER, I.H.H., ANNIGHÖEFER, P.; BARBEITO, I.; PRETZSCH, H.; RUIZ-PEINADO, R.; STARK, H.; VACCHIANO, G.; ZLATANOV, T.; CHAKRABORTY, T.; SAHA, S.; SILSESHI, G.W. 2017. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *For Ecol Manage* 396: 160 – 175.

FORRESTER, D.I.; DUMBRELL, I.C.; ELMS, S.R.; PAUL, K.I.; PINKARD, E.A.; ROXBURGH, S.H.; BAKER, T.G. 2020. Can crown variables increase the generality of individual tree biomass equations? *Trees* 35(1): 15 – 26.

HOSOI, F.; NAKAI, Y., OMASA, K. 2013. Voxel tree modeling for estimating leaf area density and woody material volume using 3-D LiDAR data. *J. Photogramm. Remote Sens.* II-5/W2: 115 -120.

JANSONS, A.; RIEKSTS-RIEKSTINS, J.; SENHOFA, S.; KATREVICS, J.; LAZDINA, D.; SISENIS, L. 2017. Above-ground biomass equations of populus hybrids in Latvia. *Balt For* 23: 507 – 514.

JENKINS, J.C.; CHOJNACKY, D.C.; HEATH, L.S.; BIRDSEY, R.A. 2003. National-scale biomass estimators for United States tree species. *For Sci* 49: 12 – 35.

KAASALAINEN, S.; KROOKS, A.; LISKI, J.; RAUMONEN, P.; KAARTINEN, H.; KAASALAINEN, M.; PUTTONEN, E.; ANTTILA, K.; MÄKIPÄÄ, R. 2014. Change detection of tree biomass with terrestrial laser scanning and quantitative structure modelling. *Remote Sens. Environ.* 6: 3906 – 3922.

LITVAK, M.; MILLER, S.; WOFSY, S.C.; GOULDEN, M. 2003. Effect of stand age on whole ecosystem CO₂ exchange in the Canadian boreal forest. *J Geophys Res* 108, D3, 8225.

LU, D. 2005. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *Int J Remote Sens* 26: 2509 – 2525.

LUYSSAERT, S.; SCHULZE, E.D.; BÖRNER, A.; KNOHL, A.; ET AL. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455(7210), pp.213-215.

MENÉNZ-MIGUÉLEZ, M.; CANGA, E.; BARRIO-ANTA, M.; MAJADA, J.; ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P. 2013. A three level system for estimating the biomass of *Castanea sativa* Mill. coppice stands in north-west Spain. *For Ecol Manage* 291: 417 – 426.

MENÉNZ-MIGUÉLEZ, M.; RUIZ-PEINADO, R.; DEL RÍO, M.; CALAMA, R. 2021. Improving tree biomass models through crown ratio patterns and incomplete data sources. *Eur J For Res* 140: 675 - 689.

METZ., J.Ö.; SEIDEL, D.; SCHALL, P.; SCHEFFER, D.; SCHULZE, E.D.; AMMER, C. 2013. Crown modeling by terrestrial laser scanning as an approach to assess the effect of aboveground intra- and interspecific competition on tree growth. *For Ecol Manage* 310: 275 – 288.

MOLINA-VALERO, J.A.; VILLAMAYOR-GINZO, M.J.; NOVO-PÉREZ, M.A.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.A.; PÉREZ-CRUZADO, C. 2019. Estimación del área basimétrica en masa maduras de *Pinus sylvestris* en base a una única medición del escáner láser terrestre (TLS). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 45(3): 97 – 116.

MOORTHY, I.; MILLER, J.R.; JIMENEZ BERNI, J.A.; ZARCO-TEJADA, P.; HU, B.; CHEN, J. 2011. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree Crown architecture using terrestrial laser scanning data. *Agric. For. Meteorol.* 151: 204 – 214.

PAJKÍK, J.; KONÔPKA, B.; LUKAC, M. 2008. Biomass functions and expansion factors in young Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) trees. *For Ecol Manage* 256: 1096 – 1103.

- POORTER, H.; NIKLAS, K.J.; REICH, P.B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. 2012. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytol* 193: 30 – 50.
- POUDEL, K.P.; TEMESGEN, H. 2016. Methods for estimating aboveground biomass and its components for Douglas-fir and lodgepole pine trees. *Can J For Res* 46: 77 – 87.
- PRETZSCH, H. 2020. The course of tree growth. Theory and reality. *For Ecol Manage* 478, 118508.
- ROCHON, P. 2014. PypeTree: A tool for reconstructing tree perennial tissues from point clouds. *Sensors* 14: 4271 – 4289.
- RODRÍGUEZ-GARCÍA, C.; MONTES, F.; RUIZ, F.; CAÑELLAS, I.; PITA, P. 2014. Stem mapping and estimating standing volumen from stereoscopic hemispherical images. *Eur. J. Forest Res* 133: 895 – 904.
- RUIZ-PEINADO, R.; DEL RÍO, M.; MONTERO, G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *For Syst* 20: 176 – 188.
- RUIZ-PEINADO, R.; MONTERO, G.; DEL RÍO, M. 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *For Syst* 21: 42 – 52.
- SAS INSTITUTE INC. 2004. SAS/STAT®. 9.1. User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- STEPHENSON, N.L.; DAS, A.J.; CONDIT, R.; ET AL. 2014. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature* 507: 90 - 93.
- STOVALL, A.E.L.; ANDERSON-TEIXEIRA, K.J.; SHUGART, H.H. 2018. Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry. *For Ecol Manage* 427: 217 – 229.
- TAKOUDJOU, S.M.; PLOTON, P.; SONKÉ, B.; HACKENBERG, J.; GRIFFON, S.; DE COLIGNY, F.; KAMDEM, N.G.; LIBALAH, M.; MOFACK, G.; LE MOGUÉDEC, G.; PELISSIER, R.; BARBIER, N. 2017. Using terrestrial laser scanning data to estimate large tropical trees biomass and calibrate allometric models: A comparison with traditional destructive approach. *Methods in Ecology and Evolution* 9(4): 905 – 916.
- TUMWEBAZE, S.B.; BEVILACQUA, E.; BRIGGS, R.; VOLK, T. 2013. Allometric biomass equations for tree species used in agroforestry systems in Uganda. *Agrofor Syst* 87: 781 – 795.
- USOLTSEV, V.A.; SHOBARI, S.O.R., TSEPORDEY, I.S.; CHASOVSKIKH, V.P. 2018. Modeling the additive structure of stand biomass equations in climatic gradients of Eurasia. *Environ Qual Manag* 28: 55 – 61.
- UZQUIANO-PÉREZ, S. 2014. Mediciones dendrométricas y dasométricas mediante técnicas LiDAR y fotogramétricas. Master Thesis. University of Valladolid.

UZQUIANO, S.; BARBEITO, I.; SAN MARTÍN, R.; ENBRECHT, M.; SEIDEL, D.; BRAVO, F. 2021. Quantifying Crown morphology of mixed pine-oak Forests using terrestrial laser scanning. *Remote Sensing* 13, 4955: 1 – 17.

VEJPUSTKOVÁ, M.; ZAHRADNÍK, D.; CIHÁK, T.; SRÁMEK, V. 2015. Models for predicting aboveground biomass of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Czech Republic. *J For Sci* 61: 45 – 54.

WANG, X.; ZHAO, D.; LIU, G.; YANG, C.; TESKEY, R.O. 2018. Additive tree biomass equations for *Betula platyphylla* Suk. plantations in Northeast China. *Ann For Sci* 75(60).

WEISKITTEL, A.R.; MACFARLANE, D.W.; RADTKE, P.J.; AFFLECK, D.L.R.; TEMESGEN, H.; WOODALL, C.W.; WESTFALL, J.A.; COULSTON, J.W. 2015. A Call to Improve Methods for Estimating Tree Biomass for Regional and National Assessments. *J For* 113: 414 – 424.

YANG, B.; XUE, W.; YU, S.; ZHOU, J.; ZHANG, W. 2019. Effects of Stand Age on Biomass Allocation and Allometry of *Quercus acutissima* in the Central Loess Plateau of China. *Forests* 10:41.

ZHOU, X.; HEMSTROM, M.A. 2009. Estimating aboveground tree biomass on forest land in the pacific northwest: A comparison of approaches. USDA For Serv - Res Pap PNW-RP 1–18.