



## 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



## Comparativa entre los métodos de masa y árbol individual en la estimación del crecimiento y existencias mediante datos LiDAR multitemporales.

JURADO VARELA, A.<sup>1</sup>, CUADROS TAVIRA, S.<sup>2</sup>, y GUERRA HERNÁNDEZ, J. <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Servicio de Ordenación y Gestión Forestal. Dirección General de Política Forestal. Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Población y Territorio. Junta de Extremadura. Avenida Luis Ramallo s/n. Mérida.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes (E.T.S.I.A.M.) Campus Universitario de Rabanales. Universidad de Córdoba.

<sup>3</sup> Forest Research Centre, School of Agriculture, University of Lisbon, Instituto Superior de Agronomia (ISA), Tapada da Ajuda, 1349-017, Lisboa, Portugal

### Resumen

El objetivo de este trabajo consistió en estudiar la validez del método de masa y de árbol individual para estimar el crecimiento en volumen y en área basimétrica de una masa de *P. pinea* (*Pinus pinea* L.) mediante el tratamiento de los datos LiDAR multitemporales del PNOA (2010-2018). Para ello se compararon el crecimiento y las existencias obtenidas mediante métodos de masa y de árbol individual con las obtenidas mediante un inventario por muestreo estadístico. El área de estudio se centró en una masa de *P. pinea* de 264,4 has del monte de utilidad pública nº 1 “Tudía y sus Faldas”, localizado en el Término Municipal de Calera de León (Badajoz), en las que no ha habido intervenciones, perturbaciones, ni mortalidad significativas en la masa durante el periodo considerado. La metodología de LiDAR de masa a partir de datos multitemporales LiDAR-PNOA (2010-2018) mostró unos resultados muy fidedignos en la estimación del crecimiento y de las existencias para las dos coberturas del LiDAR PNOA, obteniéndose una diferencia solamente de un 2,19 % para el variable crecimiento en volumen con respecto al inventario por muestreo. En cambio, la metodología de árbol individual sobreestimó ligeramente el crecimiento a partir de los datos multitemporales LiDAR-PNOA (2010-2018) en un 13,91 % debido a una subestimación en las alturas en la cobertura del año 2010, y por lo tanto en las existencias de volumen para ese año, derivado de la baja densidad de puntos del PNOA 2010 (0,5 puntos/m<sup>-2</sup>) en comparación con la de 2018 (1 punto/m<sup>-2</sup>).

### Palabras clave

Teledetección, inventario, PNOA, *P. pinea*.

### 1. Introducción

El láser escáner aerotransportado (ALS “Airbone Laser Scanning”), también denominado como LiDAR (Light Detection and Ranging) es un sistema de teledetección que, estando acoplado a un avión, helicóptero o vehículo aéreo no tripulado, emite pulsos láser que retornan una o varias al sistema con diferente intensidad creando así una nube de puntos tridimensional con abundante información sobre la estructura vertical de la vegetación (HYPPÄ et al., 2008; LIM et al., 2003). En el caso de zonas arboladas, la mayoría de los pulsos láser son reflejados por las ramas y las hojas de la cubierta vegetal, llegando solo una pequeña parte de los pulsos hasta la superficie del terreno aprovechando pequeños huecos o aberturas en la vegetación. La forma y la intensidad en la que el conjunto de los pulsos láser llega a la vegetación y retornan al sistema LiDAR, junto con el desarrollo de modelos estadísticos predictivos permiten estimar distintas variables dasométricas descriptivas de

la masa forestal sin necesidad de recurrir necesariamente a los inventarios forestales por muestreo (VAN LEEUWEN AND NIEUWENHUIS, 2010).

La primera cobertura LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) ya está disponible para todo el territorio español, mientras que la segunda cobertura pronto estará disponible para todas las CCAAs, con unos datos de densidad de puntos promedio teóricos que varían desde 0.5 a 14 puntos/m<sup>2</sup>. En Extremadura, la segunda cobertura LiDAR-2018 (1 pto/m<sup>2</sup>) del proyecto PNOA-LiDAR ofrece una oportunidad única para estimar crecimientos de las masas forestales mediante el uso de datos multitemporales LiDAR (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2021). En ese sentido, la elaboración de inventarios LiDAR realizados mediante la aplicación de modelos predictivos de masa a partir de las dos coberturas de la nube de puntos LiDAR PNOA de los años 2010 y 2018 ha permitido a la Administración Forestal de Extremadura llevar a cabo la ordenación de aproximadamente unas 50.000 has de montes de utilidad pública y montes consorciados. Además, en el último año se ha llevado a cabo el inventario LiDAR de toda la superficie forestal de Extremadura mediante la expansión continua del IFN4 mediante técnicas LiDAR, desarrollando de esta forma modelos predictivos de masa para cada uno de los 16 estratos de vegetación definidos (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2019).

Para la realización de este trabajo se eligió el Monte de Utilidad Pública nº 1 de la Provincia de Badajoz, denominado “Tudía y sus Faldas” de 748 ha. , poblada por una masa pura de *P. pinea* de unas 347,91 ha. de superficie, procedentes de una repoblación forestal realizada por Patrimonio Forestal del Estado en los años 50.

En el año 2009 el Servicio de Ordenación y Gestión Forestal de la Junta de Extremadura licitó la redacción de la ordenación del MUP-1 BA “Tudía y sus Faldas”, realizándose el inventario forestal basado en parcelas de muestreo durante el año 2010. En este inventario se obtuvo el crecimiento medio anual de la masa de *P. pinea* mediante la obtención del crecimiento radial en los últimos 10 años, con aproximación al milímetro mediante una barrena de Pressler de un bastoncillo sobre el que se determinó el crecimiento medio del estrato de *P. pinea* , resultando un valor de 2,73 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>.

La circunstancia de que la fecha del inventario forestal por muestreo del proyecto de ordenación y de la fecha del vuelo LiDAR de la primera cobertura del PNOA fueran coincidentes (año 2010) resultó una gran ventaja a GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015, 2016 para desarrollar modelos LiDAR predictivos de masa a partir del inventario forestal por muestreo realizado en la ordenación del monte *Tudía y sus Faldas* junto con los estadísticos de la distribución de alturas de la nube de puntos LiDAR obtenidos del vuelo del PNOA. Al ser coincidentes en fecha tanto el vuelo LiDAR como el inventario por muestreo, el modelo predictivo de masa elaborado por GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015 pudo aplicarse de nuevo en este trabajo con la segunda cobertura del LiDAR-PNOA (año 2018) para estimar las existencias correspondientes a ese año, y por ende estimar el crecimiento de la masa comparando los resultados obtenidos en 2018 con respecto a 2010.

Todas estas circunstancias anteriormente descritas permiten discutir los resultados obtenidos con los alcanzados por otros autores en cuyos trabajos también se estudiaba la comparativa entre métodos de masa y de árbol individual, a pesar que los resultados obtenidos en esta materia no son siempre directamente comparables por las diferentes características de la masa de estudio.

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar la validez del método de masa y de árbol individual para estimar el crecimiento y las existencias en volumen y área basimétrica mediante el

tratamiento de datos multitemporales LiDAR-PNOA (2010-2018) para el *P. pinea* presente en el monte “Tudía y sus Faldas”, comparando a su vez los resultados obtenidos con el crecimiento y existencias del inventario por muestreo elaborado en el proyecto de ordenación del monte.

### 3. Metodología

El área de estudio del presente trabajo corresponde con el Monte de Utilidad Pública nº 1 de la Provincia de Badajoz, denominado “Tudía y sus Faldas” de 748 has. de cabida. El monte presenta un relieve desde ondulado a moderadamente abrupto con pendientes por lo general comprendidas entre el 15% y el 40%, raramente superiores al 50%, variando la altitud entre 1.110 m. de máxima en el cerro de Tudía y los 520 m. de mínima. En cuanto a la vegetación arbórea del monte destaca su diversidad de especies y por su variabilidad de estratos, estando formada principalmente por una masa pura de pino piñonero de unas 347,9 ha. de superficie, procedentes de la repoblación forestal realizada por Patrimonio Forestal del Estado en los años 50, la cual será el objeto del presente trabajo. Además, el pino piñonero también habita el monte formando una masa mixta con el rebollo en unas 164,81 ha., estando acompañado además por masas puras de rebollo (81,45 has.) y en menor medida por masas puras de *Pinus pinaster* (22,10 ha.).

A continuación, se describen las dos metodologías de la estimación del crecimiento, volumen y área basimétrica, ya sea mediante métodos de masa o árbol individual:

#### 3.1 Metodología de la estimación del crecimiento, volumen, área basimétrica y mediante métodos de masa a partir de datos LiDAR multitemporales (2010-2018).

Para calcular el crecimiento y para obtener las existencias en volumen y área basimétrica se partió del modelo predictivo de masa desarrollado por GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015 anteriormente descrito, en el que se estimaron distintas variables dasométricas a nivel de masa (volumen, área basimétrica, altura de Lorey) y fracciones de biomasa para masas puras de *Pinus pinaster*, para masas puras y mixtas de *P. pinea* y para masas puras de rebollo para el monte “Tudía y sus Faldas”. El modelo aplicado tuvo la siguiente expresión:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

en el que Y es la variable de masa a estimar,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ , parámetros del modelo y  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son los estadísticos procedentes de la nube de puntos LiDAR. Los modelos desarrollados para las masas puras de *P. pinea* que estiman el volumen con corteza y el área basimétrica que servirán de base en el presente trabajo para estimar las existencias mediante técnicas LiDAR de masa tanto para el año 2010 y 2018 se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resumen de los modelos Lidar aplicados en este estudio para las variables de masa, estadísticos de bondad del ajuste y resultados de los errores estimados a nivel de parcela para masas de puras de *P. pinea*: G ( $m^2 ha^{-1}$ ): Área basimétrica ; V ( $m^3 ha^{-1}$ ):Volumen con corteza ; h10: Altura percentil 10; ARAM: Todos retornos encima de la media; TFR: Total primeros retornos; hmean: Altura media; CRR: ((altura media - altura min) / (altura max - altura min)); PARA2: Porcentaje de todos los retornos por encima de 2 metros; R2adj: coeficiente de determinación ajustado; rRMSE(%):error medio cuadrático relativo.( GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015)

Masas puras de <i>P. pinea</i>				
Variable dependiente	Variable independiente	Parámetros	R2adj	rRMSE(%)
G	h10, ARAM/TFR	$\beta_0: -1,37539$ $\beta_1: 1,20412$	0,67	26,25

		$\beta_2: 0,26586$		
V	hmean, CRR, PARA2	$\beta_0: -62,91283$ $\beta_1: 7,41690$ $\beta_2: 61,78661$ $\beta_3: 0,72387$	0,74	26,5

Para aplicar este modelo se obtuvo en primer lugar los estadísticos o métricas LiDAR y calculados a partir de los datos de la nube de puntos de las dos coberturas del LiDAR PNOA de 2010 y 2018 mediante el programa FUSION LIDAR Toolkit (MCGAUGHEY, 2018). Los distintos pasos que se dieron mediante este programa fueron:

- 1.Extracción de los puntos correspondientes al suelo mediante la herramienta “Groundfilter”, el cual usa el filtro de KRAUS AND PFEIFER,(1998), el cual permite diferenciar aquellos retornos LiDAR que pertenecen al terreno de aquellos que pertenecen a los objetos situados por encima de él. Se consideró para este filtrado de un tamaño de pixel de 1 metro.
- 2. Generación de un modelo digital de superficie mediante la herramienta “GridsurfaceCreate”, la cual calcula la altura de cada celda considerando la altura media de todos los retornos incluidos dentro de esa celda, considerándose un tamaño de pixel de 1 metro.
- 3. Generación de un modelo digital de copas mediante la herramienta “Canopy model”, por la cual se resta al modelo digital de superficie el modelo digital del terreno, obteniéndose de esta forma el modelo digital de altura de vegetación del monte, con un tamaño de píxel de un metro.
- 4-Obtención de las métricas o estadísticos LiDAR mediante la herramienta “Gridmetrics”, considerando únicamente aquellos retornos por encima de 2 metros, y un tamaño de celda de 20 x 20 metros. De esta forma se obtuvieron 65 estadísticos de elevación para cada una de las 18.700 celdas existentes en el monte, entre los cuales se encuentran los siguientes:

Para seleccionar aquellas celdas válidas para estimar el crecimiento del *P. pinea*, de las 18.700 celdas de 20 x 20 metros incluidas en las 748 ha. del monte Tudía y sus Faldas, se seleccionaron en primer lugar aquellas celdas que se corresponden con el estrato definido en el inventario del proyecto de ordenación y en el modelo predictivo de masa como “Masas puras de *P. pinea*”, abarcando una superficie de 347,91 ha . Posteriormente, se seleccionaron aquellas celdas que a su vez no sufrieron intervenciones como claras, clareos, podas, incendios forestales,...etc. ni tampoco una mortalidad significativa durante el periodo 2010-2018. Para determinar cuáles fueron estas celdas de 20 x 20 metros que no sufrieron cambios en la masa durante ese periodo se consideró que fueron aquellas cuya variación de fracción de cabida cubierta entre el año 2018 y el año 2010 fue positiva, descartando de esta forma las celdas cuya fracción de cabida cubierta en el año 2018 fue inferior a la del año 2010. Esta superficie que abarcan todas estas celdas en las que no hubo intervenciones ni mortalidad es la que se tuvo en cuenta para estimar el crecimiento y las existencias de la masa de *P. pinea* objeto del presente trabajo, abarcando un total de 264,4 ha. (Figura 1) :

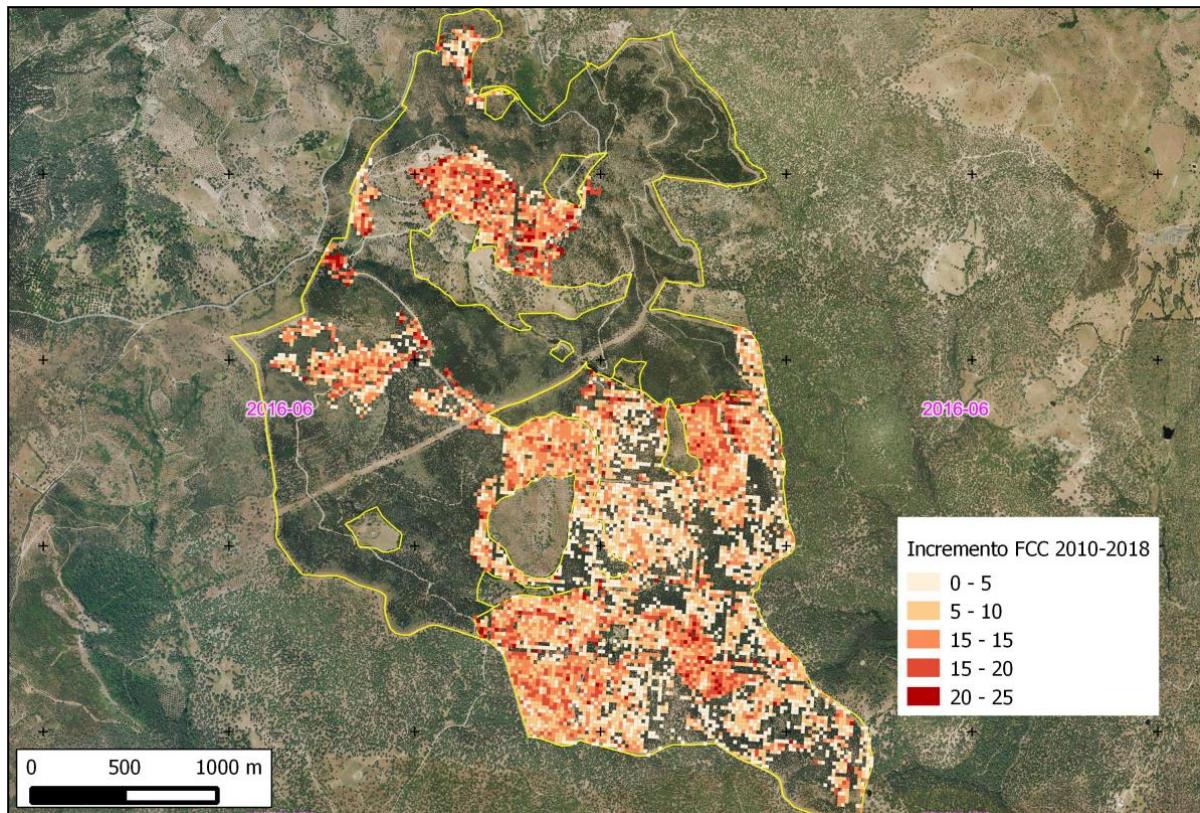


Figura 1. Superficie de *P. pinea* considerada para la estimación del crecimiento considerando aquellas zonas con un incremento positivo de la fracción de cabida cubierta durante el periodo 2010-2018.

Una vez conocida la superficie que será objeto de la estimación del volumen, área basimétrica y crecimiento mediante métodos LiDAR de masa se aplicaron en las celdas de 20 x 20 metros consideradas los modelos de volumen con corteza y de área basimétrica para la masa pura de *P. pinea* elaborados por GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015, y resumidos en la tabla 1, utilizando los estadísticos o métricas LiDAR obtenidos de las coberturas LiDAR-PNOA de los años 2010 y 2018. De esta forma, y aplicando estos modelos predictivos LiDAR de masa para ambas fechas se obtuvieron los datos medios y los datos para cada una de las 6.611 celdas consideradas de volumen con corteza y de área basimétrica. Restando los valores de cada celda de los valores obtenidos de volumen de 2018 y 2010 y dividiendo entre el número de años transcurridos entre ambas fechas ( 8 años ) se obtuvo el crecimiento medio en volumen ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) para cada una de las celdas consideradas de 20 x 20 metros. (Ecuación 1).

$$\text{Crecimiento Volumen (VOL)} \left( \frac{\frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{VOL LiDAR 2018} - \text{VOL LiDAR 2010}}{2018 - 2010} \quad (1)$$

De la misma forma se calculó el crecimiento anual del área basimétrica (G). (Ecuación 2)

$$\text{Crecimiento Area basimetrica (G)} \left( \frac{\frac{\text{m}^2}{\text{ha}}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{G LiDAR 2018} - \text{G LiDAR 2010}}{2018 - 2010} \quad (2)$$

### 3.2 Metodología de la estimación del volumen, área basimétrica y crecimiento mediante metodología de árbol individual a partir de datos LiDAR multitemporales (2010-2018)

A diferencia de la estimación de las variables dasométricas y crecimientos elaborados anteriormente mediante métodos de masa en el que se relacionaron dichas variables con la estructura de la nube de puntos en cada una de las celdas de 20 x 20 metros, mediante la metodología de inventario LiDAR de árbol individual se consiguió individualizar cada uno de los árboles del monte y conocer su valor de altura, usando las coberturas LiDAR-PNOA del año 2010 y 2018. De esta forma, conocido el número de pies, la altura de cada uno de los pies y la relación altura diámetro normal obtenida de los árboles tipo del inventario por muestreo del proyecto de ordenación, se pudo estimar tanto como el volumen y el área basimétrica de cada árbol individual encontrado para cada uno de los años considerados (2010 y 2018), y por lo tanto se pudo obtener con estos datos el crecimiento anual tanto en volumen y área basimétrica de cada uno de los árboles para este periodo.

Una vez conocidos el volumen y el área basimétrica de cada árbol, se obtuvo el volumen y el área basimétrica total del estrato de *P. pinea* considerado mediante la suma de cada uno de los valores de estas variables de cada uno de los árboles detectados referidos a la superficie.

La individualización de cada uno de los árboles a partir de los modelos de copas, se inició mediante la localización de los puntos más elevados de su entorno cercano, los cuales representan los ápices de cada uno de los árboles. Se tomó la altura de 3 metros por debajo de la cual se consideró complejo distinguir entre vegetación arbustiva y vegetación arbórea. Para ello, se partió del modelo digital de alturas de vegetación o modelo digital de copas normalizado generado anteriormente mediante la herramienta “Canopymodel” del programa FUSION LIDAR Toolkit (MCGAUGHEY, 2014). Posteriormente, se utilizó la herramienta “Canopymaxima” del mismo programa, por la cual se identificó la altura máxima de cada uno de los árboles presentes en el monte pertenecientes al estrato de masa pura de *P. pinea*, tomando un ancho de ventana un valor de 5 metros del ancho de ventana, y un valor de resolución de 1,7.

Este proceso se realizó para las dos coberturas del LiDAR PNOA (2010 y 2018), por lo que se consiguió conocer las alturas de cada uno de los árboles de *P. pinea* para ambas fechas, tal como se muestra en la figura 2.

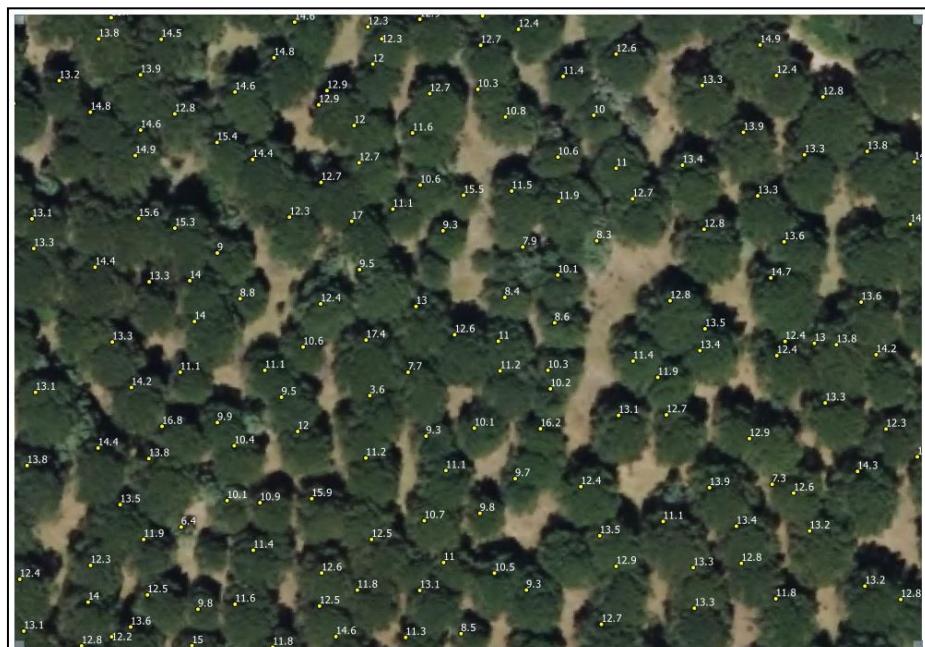


Figura 2. Valores de altura máxima (m) de los pies de pino piñonero del monte Tudía y su Faldas mediante la localización de los máximos a partir de la nube de puntos LiDAR PNOA del 2018

A partir del inventario del proyecto de ordenación del monte Tudía y sus Faldas realizado en el año 2010, se ajustó mediante una regresión no lineal una ecuación potencial para estimar el diámetro en función de la altura usando como muestra 359 árboles tipo de la especie *P. pinea* procedentes de las parcelas de inventario (Ecuación 3). Para el ajuste del modelo potencial fue usado el package *nls* en el software R (R CORE TEAM , 2020) . El coeficiente de determinación ajustado (*adjR<sup>2</sup>*) de la regresión fue de 0.79 con un error medio cuadrático (RMSE) de 5.5 cm y un error medio cuadrático relativo de 16.88%. El gráfico de dispersión del modelo para ver el comportamiento de los valores predichos frente a los observados se muestra en la figura 3.

$$d = 4.42077 * Ht^{0.90307} \quad (3)$$

donde *Ht* es la altura total en metros y *d* es el diámetro normal en cm.

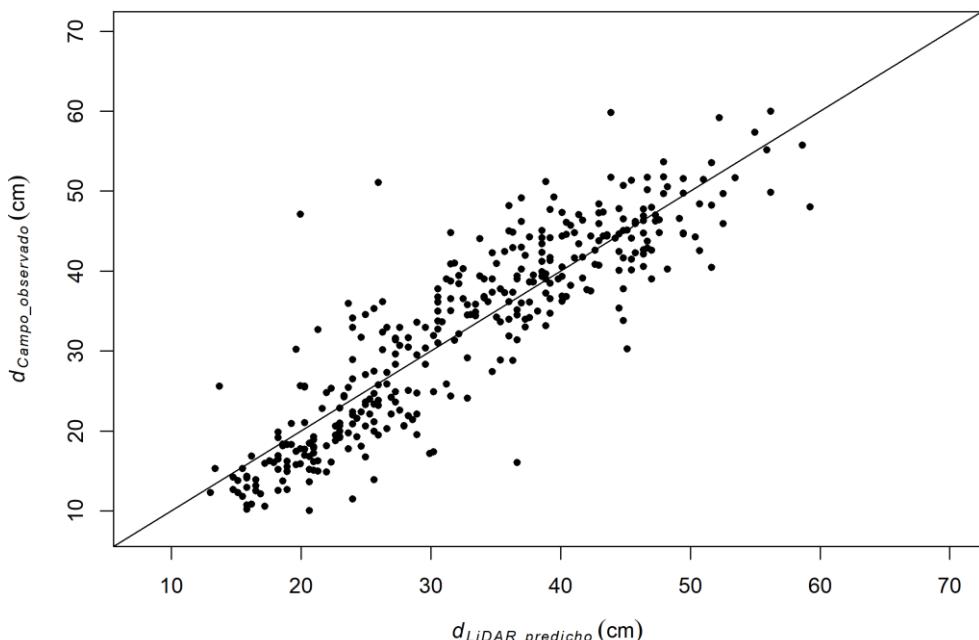


Figura 3. Gráfico de dispersión de los valores predichos obtenidos a partir del modelo de diámetro ajustado en función de la altura frente a los valores observados de diámetro en los árboles tipo del proyecto de ordenación.

Aplicando esta ecuación a los valores de altura obtenidos para cada uno de los árboles identificados en toda la superficie considerada mediante la metodología de árbol individual se estimó el diámetro y el área basimétrica de cada uno de los árboles, para las dos fechas de la cobertura del LiDAR-PNOA (2010 y 2018).

Igualmente, se estimó también el volumen de cada uno de los árboles a partir del diámetro y altura estimada con LiDAR aplicando la misma tarifa de cubicación empleada en el proyecto de ordenación del monte, la cual fue la supertarifa del Inventario Forestal Nacional (IFN3) (Ecuación 4) para la especie *P. pinea* para la provincia de Badajoz Extremadura.

$$V = 22,1 + 0.0003 * d^2 * Ht \quad (4)$$

donde *d*, es el diámetro normal en mm , *Ht* la altura total en metros y *V* el volumen en dm<sup>3</sup>

Una vez conocido el volumen de 2018 y el volumen de 2010 para cada uno de los árboles se obtuvieron las existencias totales para ambas coberturas en volumen y área basimétrica mediante el sumatorio de ambas variables para cada uno de los árboles. Para obtener el crecimiento medio anual se dividió la diferencia de existencias totales entre el número de años transcurridos entre ambas coberturas del PNOA ( 8 años) y entre la superficie del monte en las que no hubo intervenciones debido a trabajos selvícolas, aprovechamientos o mortalidad. Al igual que el caso que en la metodología del LiDAR de masa se consideró esta zona aquella definida por todas las celdas de 20 x 20 metros en la que la variación de fracción de cabida cubierta (calculada por el estadístico de porcentaje de primeros retornos por encima de 2 metros) fuera positiva en el periodo considerado, abarcando una superficie 264,40 ha., tal como se muestran en las siguientes ecuaciones (5 y 6):

$$\text{Crecimiento Volumen (VOL)árbol} \left( \frac{\frac{m^3}{ha}}{año} \right) = \frac{\frac{(\Sigma (\text{VOL 2018 árbol} - \text{VOL 2010 árbol})}{264,40}}{2018 - 2010}}{(5)}$$

$$\text{Crecimiento Área basimétrica (AB)árbol} \left( \frac{\frac{m^3}{ha}}{año} \right) = \frac{\frac{\Sigma (2018 árbol - AB 2010 árbol)}{264,40}}{2018 - 2010} \quad (6)$$

#### 4. Resultados

Visto todos los resultados obtenidos mediante las dos metodologías de inventario LiDAR propuestas, se resume en la siguiente tabla 2 la comparativa de los valores de crecimiento obtenidos tanto en volumen, área basimétrica y el porcentaje de variación con respecto al crecimiento obtenido en el inventario por muestreo del proyecto de ordenación.

Tabla 2. Crecimiento anual en volumen y en área basimétrica según el tipo de inventario considerado, y % de variación de crecimiento en volumen con respecto al inventario por muestreo del proyecto de Ordenación

TIPO DE INVENTARIO	Crecimiento anual en volumen ( $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ )	Crecimiento anual en área basimétrica ( $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ )	% Variación Crecimiento anual en volumen
Inventario por muestreo del proyecto Ordenación	2,73	Sin datos	-----
Inventario LiDAR de masa datos multitemporales (2010-2018)	2,79	0,55	2,19 %
LiDAR Árbol individual datos multitemporales (2010-2018)	3,11	0,69	13,91 %

Se observó que el crecimiento de la variable volumen coincidió prácticamente con el obtenido mediante la metodología LiDAR de masa con el obtenido en el inventario por muestreo del proyecto de ordenación del monte habiendo solamente una diferencia de un 2,19 %. En cambio el crecimiento obtenido mediante la metodología de árbol individual fue ligeramente superior en términos porcentuales (13,91 %) con respecto a la del inventario por muestreo.

A continuación, se muestra en la figura 4 y 5 el crecimiento anual en volumen y en área basimétrica del *P. pinea*, respectivamente, en aquellas zonas del monte no intervenidas.

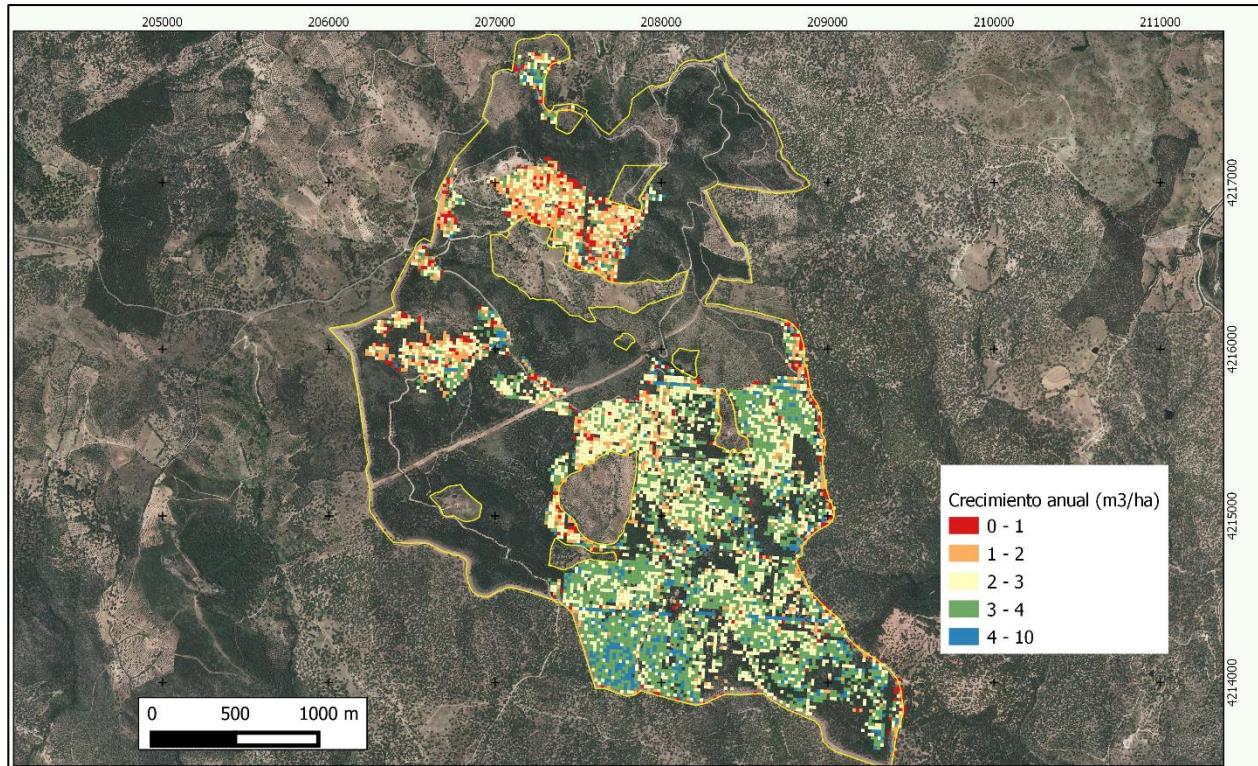


Figura 4. Crecimiento anual en volumen con corteza ( $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) de las masas puras de pinar no intervenidas del monte "Tudía y sus Faldas" elaborado mediante datos LiDAR multitemporales del PNOA 2010-2018 mediante métodos de masa.

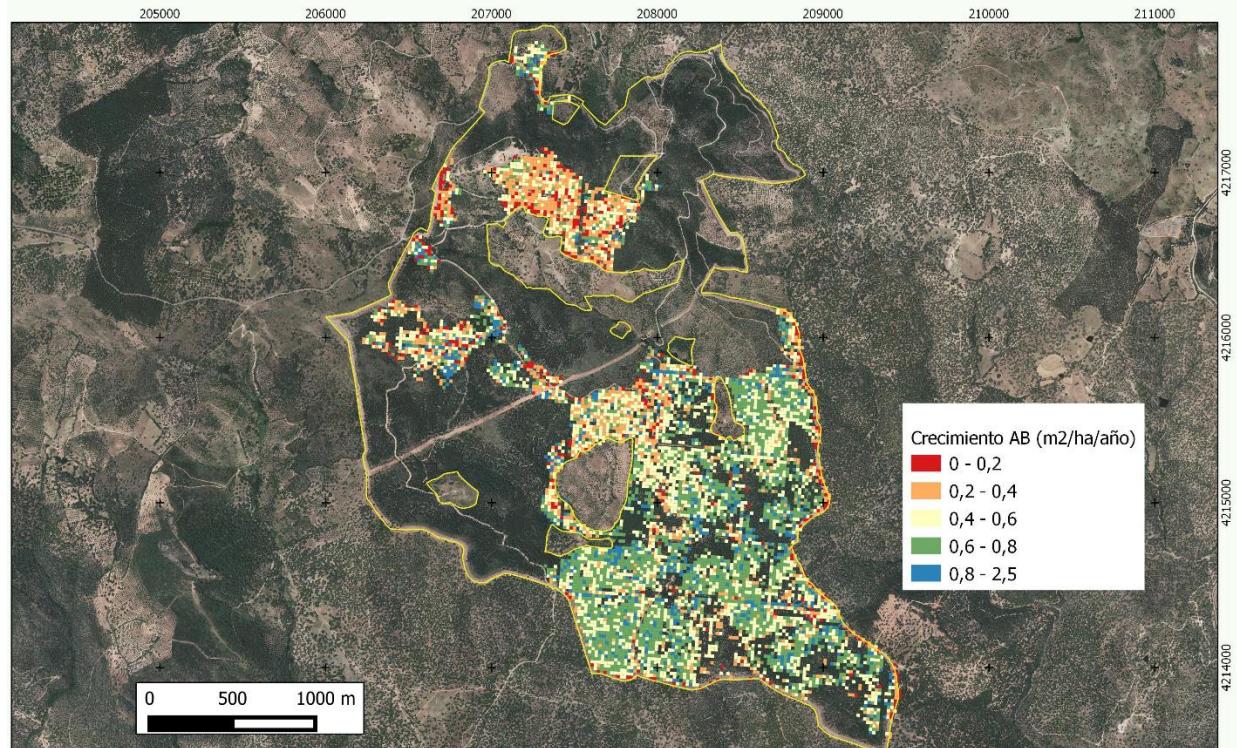


Figura 5. Crecimiento anual en área basimétrica ( $m^2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) de las masas puras de pinar no intervenidas del monte "Tudía y sus Faldas" elaborado mediante datos LiDAR multitemporales del PNOA 2010-2018 mediante método de árbol individual.

A continuación se muestran (Tabla3) las existencias en volumen, área basimétrica y los valores de altura para cada uno de los tipos de inventario considerados, así como el porcentaje de variación tomando de referencia el inventario por muestreo del monte.

Tabla 3. Existencias en volumen, área basimétrica y valores de altura para cada uno de los tipos de inventario considerados.

TIPO DE INVENTARIO	VOLUMEN (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )		AREA BASIMETRICA (m <sup>2</sup> / ha <sup>-1</sup> )		ALTURA ÁRBOLES (m)	
	2010	2018	2010	2018	2010	2018
Inventario por muestreo del proyecto Ordenación	80,72	102,56*	15,65	Sin datos	10,26	Sin datos
Inventario LiDAR de masa datos multitemporales (2010-2018)	76,10	98,39	15,57	19,97	11,29	12,46
LiDAR Arbol individual datos multitemporales (2010-2018)	61,14	85,97	12,86	15,72	9,61	11,7

\*Volumen estimado en 2018 teniendo en cuenta el crecimiento obtenido en el inventario por muestreo.

Se observa en la tabla anterior que los valores de altura media detectados mediante el método de LiDAR árbol individual para el año 2010 (9,61 metros) es sensiblemente inferior la obtenida en el inventario por muestreo (10,26 metros), por lo que se observa una subestimación de un 6,33% de los valores de altura de los árboles en el año 2010 con respecto al inventario por muestreo.

En la tabla 4 se resume el porcentaje de variación del crecimiento en volumen, volumen, área basimétrica y número de pies con respecto al inventario por muestreo de los dos tipos de inventarios LiDAR considerados, ya sea LiDAR de masa o árbol individual:

TIPO DE INVENTARIO	% Variación crecimiento en volumen (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	% Variación en Volumen (m <sup>3</sup> /ha)		% Variación Área basimétrica (m <sup>2</sup> /ha)	
	2010-2018	2010	2018	2010	2018
Inventario LiDAR de masa datos multitemporales (2010-2018)	2,19	-5,72	-4,06	-0,51	Sin datos
LiDAR Arbol individual datos multitemporales (2010-2018)	13,91	-24,26	-16,18	-17,83	Sin datos

Tabla 4. Porcentaje de variación del crecimiento en volumen, área basimétrica con respecto al inventario por muestreo

Por otra parte, hay una gran similitud de las existencias tanto en volumen como en área basimétrica entre el inventario por muestreo del proyecto de ordenación y el Inventario LiDAR de masa, resultando solamente un 5,72% y un 4,06% en la variable volumen para las coberturas 2010 y 2018 respectivamente, y solamente un 0,51 % para el área basimétrica del año 2010. El inventario del proyecto de ordenación no calculó el crecimiento anual en área basimétrica, por lo que no se pudo obtener el área basimétrica para el año 2018.

En cuanto a los resultados de las existencias obtenidas del inventario LiDAR elaborado mediante la metodología de arbol individual los resultados son muy dispares; el volumen se subestima en un 24,46 % para la 1<sup>a</sup> cobertura LiDAR del PNOA del 2010 con respecto al proyecto de ordenación, debido a que la baja densidad de puntos de esa primera cobertura (0,5 puntos m<sup>-2</sup>) supuso una subestimación de las alturas del arbolado (un 6,33% inferior con respecto al inventario por muestreo), y por lo tanto de sus existencias. Esta diferencia no es tan acusada si consideramos la segunda cobertura LiDAR PNOA del 2018 (-16,18% de diferencia en la variable volumen), en el que la densidad de puntos es mayor (1 punto m<sup>-2</sup>), y por ello permite identificar con más precisión los máximos de la altura del arbolado en comparación con la primera cobertura del LiDAR PNOA.).

## 5. Discusión

El objetivo de este estudio consistió en estudiar dos metodologías diferentes de tratamiento de los datos LiDAR (métodos de masa y árbol individual) para la estimación del crecimiento y existencias y compararlos a su vez con el inventario por muestreo. A pesar de que numerosos autores han estudiado la comparativa de los inventarios forestales entre métodos de masa y árbol individual pocos autores han estudiado la comparativa del crecimiento de estas dos metodologías a la vez usando datos LiDAR multitemporales, por lo que hay escasa bibliografía al respecto. Además, los resultados obtenidos en esta materia no son siempre directamente comparables por las diferentes características de la masa de estudio (PACKALÉN et al. 2018).

Así por ejemplo, diversos autores han estudiado la comparativa de resultados entre la metodología de árbol individual y métodos de masa (VASTARANTA et al. 2011,) concluyendo una mayor precisión de la metodología de árbol individual que la de métodos de masa, pero sin tener en cuenta los datos LiDAR multitemporales de dos coberturas diferentes.

Algunos autores que sí estudiaron el crecimiento a través de los datos LiDAR multitemporales como TOMPALSKI et al, 2019 concluyeron que las estimaciones directas del crecimiento en volumen, altura y área basimétrica fueron más precisos en comparación con métodos indirectos a través de la modelización de datos LiDAR multitemporales, por lo que habrá que aplicar esta metodología con cierta cautela, especialmente en masas de crecimiento lento o elevada mortalidad. De la misma forma (CAO et al., 2016) y (BOLLANDSÅS et al., 2013) obtuvieron la misma conclusión, las estimaciones directas del crecimiento obtienen mejores resultados en comparación con las estimaciones indirectas realizadas a través de los datos multitemporales LiDAR, resultando crecimientos inferiores en comparación con las estimaciones directas. En cambio, en los resultados obtenidos en el presente trabajo se obtienen crecimientos y existencias similares entre las estimaciones indirectas obtenidas tras la aplicación de los modelos LiDAR de masa para las dos coberturas LiDAR PNOA consideradas, si las comparamos con las estimaciones directas del inventario por muestreo.

De la misma forma que en los estudios analizados por los autores anteriormente citados, especialmente la metodología de estimación indirecta del crecimiento mediante LiDAR árbol individual analizada en el presente estudio hay que aplicarla con mucha cautela si se aplican las dos coberturas del LiDAR PNOA, ya que debido a la baja densidad de puntos del PNOA de 2010 (0,5 puntos m<sup>-2</sup>) se infraestimó la altura máxima y en menor medida el número de los árboles identificados, obteniéndose de esta forma los valores de volumen obtenidos sean muy inferiores a los reales para el año 2010. Esta circunstancia de infraestimación del volumen fue menos acuciada para la cobertura del PNOA de 2018, al disponer de una mayor densidad de puntos ( 1 punto m<sup>-2</sup>). Esta misma conclusión, de que ambos inventarios de métodos de masa y árbol individual consiguen resultados similares a pesar de una ligera de infraestimación de las alturas mediante la tecnología de árbol individual ( SUAREZ MINGUEZ, J. et al. 2018).

## 6. Conclusiones

La aplicación de la metodología de LiDAR de masa obtenido mediante el tratamiento los datos LiDAR multitemporales del PNOA (2010-2018) se presenta como una metodología válida para la estimación del crecimiento de una masa de pinar de *P. pinea* en el monte Tudía y sus Faldas, teniendo en cuenta que la diferencia del crecimiento en volumen fue solamente de un 2,19% de diferencia con respecto al del inventario por muestreo del proyecto de ordenación. ( $2,79 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  versus  $2,73 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  respectivamente).

Por otra parte, existe una gran similitud de las existencias tanto en volumen como en área basimétrica entre el inventario por muestreo del proyecto de ordenación y el Inventario LiDAR de masa, resultando solamente un 5,72% y un 4,06% de diferencia para la variable volumen para las coberturas 2010 y 2018 respectivamente, y solamente un 0,51 % de diferencia para el área basimétrica del año 2010. Por ello, no parece que una mayor o menor densidad de puntos del LiDAR sea un factor determinante para obtener modelos predictivos de masa fidedignos con la realidad para las masas de *P. pinea* similares a la del objeto del estudio.

En cambio, la aplicación de la metodología de árbol individual usando los datos LiDAR PNOA multitemporales 2010-2018 sobreestimó en mayor medida el crecimiento ( $3,11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), valor ligeramente superior al obtenido en el inventario por muestreo ( $2,73 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), resultando de esta forma un 13,91% superior en comparación al inventario por muestreo. Esto se debió principalmente como consecuencia de la subestimación del volumen para el año 2010, debido a que la menor densidad de la nube de puntos para ese año minusvaloró la altura máxima detectada cada árbol individual (un 6,33% inferior), teniendo este factor una mayor influencia con respecto al menor número de pies detectados (un 2,39 % inferior). En cambio, las estimaciones de las existencias mejoraron en gran medida usando la cobertura LiDAR PNOA de 2018 por su mayor densidad de puntos (1 punto  $\text{m}^{-2}$ ), aunque quedaron también ligeramente subestimadas (un -16,18% para la variable volumen) con respecto al inventario por muestreo. Por esto se concluye que, a diferencia del LIDAR de masa, la mayor densidad de puntos del LiDAR sí influye en la estimación de las existencias aplicando la metodología de árbol individual. En el caso que la próxima cobertura LiDAR del PNOA tenga una densidad de puntos al menos de 1 punto  $\text{m}^{-2}$  o superior se podrá volver a estudiar la validez de la metodología del árbol individual en la estimación del crecimiento en volumen y área basimétrica de las masas de *P. pinea*.

## 7. Bibliografía

CAO, L.; COOPS, N.C.; INNES, J.L.; SHEPPARD, S.R.; FU, L.; RUAN, H.; SHE, G., 2016. Estimation of forest biomass dynamics in subtropical forests using multi-temporal airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 178, 158–171.

GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; JURADO-VARELA, A.; TOMÉ, M.; 2015. Uso de LiDAR aerotransportado para la estimación de variables forestales de un bosque Mediterráneo en el suroeste de España (Extremadura). En: Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos, XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Sevilla, España. 21-23 Octubre, 379-382.

GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; GÖRGENS, E. B.; GARCÍA-GUTIÉRREZ, J.; CARLOS, L.; RODRIGUEZ, E.; TOMÉ, M.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; 2016, Comparison of ALS based models for

estimating aboveground biomass in three types of Mediterranean forest. European Journal of Remote Sensing 49, 185-204.

GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; ARELLANO-PÉREZ, S.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; PASCUAL, A.; ALTELARREA, V. S.; RUIZ-GONZÁLEZ, A. D.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; 2021. Developing a site index model for *P. Pinaster* stands in NW Spain by combining bi-temporal ALS data and environmental data. Forest Ecology and Management 481, 118690.

HYYPPÄ, J.; HYYPPÄ, H.; LECKIE, D.; GOUGEON, F.; YU, X.; MALTAMO, M.; 2008. Review of methods of small footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. International Journal of Remote Sensing 29, 1339–1366.

LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.; ST-ONGE, B.; FLOOD, M.; 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. Progress in physical geography 27, 88–106.

MCGAUGHEY R; 2018. FUSION/LDV: software for LIDAR Data Analysis and Visualization, F.S. US Department of Agriculture, Pacific Northwest Research Station, Seattle, USA. 123 pp., Editor 2014

PACKALÉN, P., PITKÄNEN, J. AND MALTAMO, M., 2008. Comparison of individual tree detection and canopy height distribution approaches: a case study in Finland. In Hill, R., Rossette, J. and Suárez, J. 2008. Silvilaser 2008 proceedings, pp. 22–29

R CORE TEAM, 2020. R: A language and environment for statistical computing (Version 3.6. 1)[Computer software]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

SUAREZ MINGUEZ, J. et al. 2018. Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics, and carbon flux. Remote Sensing of Environment 204:883-897

VAN LEEUWEN, M.; NIEUWENHUIS, M.; 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. European Journal of Forest Research 129, 749–770.

VASTARANTA, M. et al.;2011 - Individual tree detection and area-based approach in retrieval of forest inventory characteristics from low-pulse airborne laser scanning data. *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 22, No.2,