

## Mediciones dendrométricas y dasométricas mediante técnicas LiDAR y fotogramétricas

Uzquiano, S.<sup>1,2\*</sup> Martínez, J.<sup>3</sup> San Martín, R.<sup>1,4</sup> Bravo, F.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Universitario de Investigación de Gestión Forestal Sostenible. Universidad de Valladolid-INIA.

<sup>2</sup> Dpto. Producción Vegetal y Recursos Forestales. E.T.S. de Ingenierías Agrarias Avda de Madrid, 57, Palencia (Palencia) 34004.

<sup>3</sup> Dpto. Urbanismo y Representación de la Arquitectura. Laboratorio de Fotogrametría E.T.S. de Arquitectura Avda Salamanca, 18, Valladolid (Valladolid) 47014.

<sup>4</sup> Dpto. Estadística e Investigación Operativa. Univ. E.T.S. de Ingenierías Agrarias Avenida de Madrid, 57, Palencia (Palencia) 34004.

\*Autor para correspondencia: [sara.uzquiano@alumnos.uva.es](mailto:sara.uzquiano@alumnos.uva.es)

### Resumen

El LiDAR (*Light Detection And Ranging*) y la fotogrametría son métodos alternativos con importante uso potencial en la inventariación de masas forestales. El presente trabajo realiza una comparación de variables dendrométricas (diámetro normal, alturas de árbol, altura y anchura de copas) y dasométricas (área basimétrica), obtenidas de forma convencional y mediante técnicas de LiDAR con un escáner terrestre y fotogrametría mediante un RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) (solo la altura total) sobre una masa de *Pinus pinaster* a través de un análisis estadístico de regresión lineal simple. Para el LiDAR terrestre, los resultados mostraron una buena estimación de las variables altura de árbol, altura de copa y área basimétrica, no así para el diámetro normal y la anchura de copa. A su vez, el cálculo de altura total mediante fotogrametría tampoco mostró una buena adecuación respecto a las medidas tradicionales. Paralelamente se demostró que el LiDAR terrestre es capaz de realizar una georreferenciación rápida y precisa de los árboles, así como de reproducir fielmente el árbol en 3D. La escasa experiencia en España de aplicación forestal de estos aparatos hace que los resultados obtenidos en este trabajo sean significativos pero no concluyentes. Se trata de herramientas que a pesar de su elevado precio, resultan rentables debido a la gran cantidad de datos capaces de generar en muy poco tiempo. Sin embargo es necesario desarrollar mecanismos que agilicen el procesado de datos.

**Palabras clave:** altura total, diámetro normal, escáner terrestre, *Pinus pinaster*, RPAS

### 1. Introducción

En la actualidad se espera, cada vez más, que los bosques sean capaces de generar madera, así como gran variedad de servicios públicos y privados (Moskal *et al.*, 2009), para ello se necesita una información que garantice la obtención de me-

didadas estadísticamente robustas, repetibles, imparciales y que sea rentable (Baltsavias, 1998). Por tanto, es de gran importancia encontrar herramientas que cumplan dichos objetivos, que además aporten gran precisión en las medidas, que sean explícitas en las características de inventariación de los bosques e información sobre su estructura, (Moskal *et al.*, 2009) y que supongan un significativo ahorro de tiempo (Holgate 1967; Bell and Dilworth, 1998). Por todo ello, se hace necesario que el ámbito forestal aproveche el avance de las tecnologías y herramientas, pero atendiendo a su vez a la sostenibilidad, incorporando componentes biológicos, ecológicos, sociales y económicos (Moskal *et al.*, 2009). La teledetección a través del LiDAR (*Light Detection And Ranging*) terrestre, o la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados o RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) se está desarrollando como medios alternativos para las mediciones de las masas forestales. En el presente trabajo se ha hecho uso de estas dos nuevas tecnologías, como métodos alternativos de obtención de diámetro normal, altura total, anchura y altura de copa y área basimétrica, comparando sus resultados con las obtenidas a través de métodos tradicionales. Una versión más detallada está disponible en Uzquiano (2014).

## 2. Material y métodos

### 2.1 Toma de datos en campo

El sitio experimental, sobre el que se realizan numerosos estudios de la masa forestal, pertenece a la Universidad de Valladolid. Se encuentra en un rodal del término municipal de Mata de Cuéllar y Vallelado (Segovia), a 757 metros de altitud (41° 22' N, 4° 29' W). La especie dominante es *Pinus pinaster* Aiton. La selvicultura aplicada en esta área está basada en la regeneración natural, durante un periodo de 20 años, en un sistema adaptado a la producción de resina y madera con masas adultas a turno de 120 años, en densidades bajas (aproximadamente 140 pies/ha) (Bravo *et al.*, 2012).

Se seleccionaron aleatoriamente tres parcelas cuadradas de 70 x 70 m (de las diez que componen el sitio experimental). Sobre ellas se midió la altura de árbol (con un hipsómetro marca *Haglöf Sweden* modelo *Vertex III* con precisión de una décima de metro) y el diámetro normal (con una forcípula con precisión de décima de centímetro), de cada uno de los árboles de la parcela seleccionadas, así como el área basimétrica de cada parcela a partir de los diámetros normales. El número total de árboles fue de 102, con una media de 40 árboles por parcela. La medición de altura de copa se llevó a cabo como en el caso de la altura total y la de anchura de copa a través de la medición de la proyección de la misma mediante una cinta métrica. Estas dos últimas medidas se realizaron sobre 54 árboles del total.

A continuación se capturaron datos LiDAR mediante el escáner terrestre *Faro Focus 3D*. En cada parcela se realizaron 25 escaneos panorámicos esféricos, que abarcan desde 0° a 360° en el ángulo horizontal y desde -60° a 90° en el ángulo vertical (en cada uno de ellos se necesitaron unos 3 minutos). Para ayudar a la conver-

si3n de escaneos en im3genes 3D en gabinete se han colocado 25 esferas blancas en cada parcela (*Fig. 1*). Dado que el equipo *Faro Scene 3D* proporciona un sistema de coordenadas locales, se utiliz3 una estaci3n total, y un GPS subm3trico, para poder referenciar todo el trabajo en coordenadas UTM.

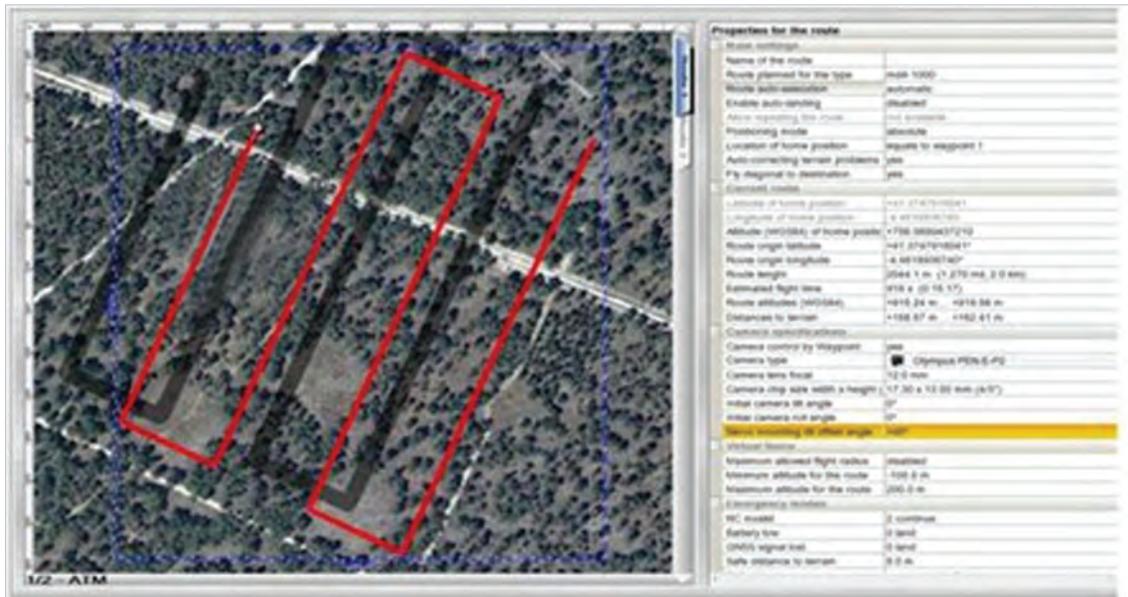


**Figura 1.** Ejemplo de colocaci3n de los barridos y los puntos de enlace llevado a cabo en cada parcela. Los puntos blancos representan las esferas y los cuadrados azules las posiciones de escaneo.

Para la obtenci3n de los datos fotogram3tricos se utiliz3 un *Cuadr3coptero Microdrones MD-1000*, al que se le incorpor3 una c3mara *Olympus E-PM1*. El vuelo se ha realizado de forma autom3tica siguiendo un recorrido dise1ado previamente por el programa *MDCockpit* (*Fig. 2*). El vuelo se realiz3 a 160 m de altura sobre el nivel del suelo y se tomaron un total de 77 fotograf3as. La duraci3n del vuelo fue de aproximadamente 22 minutos.

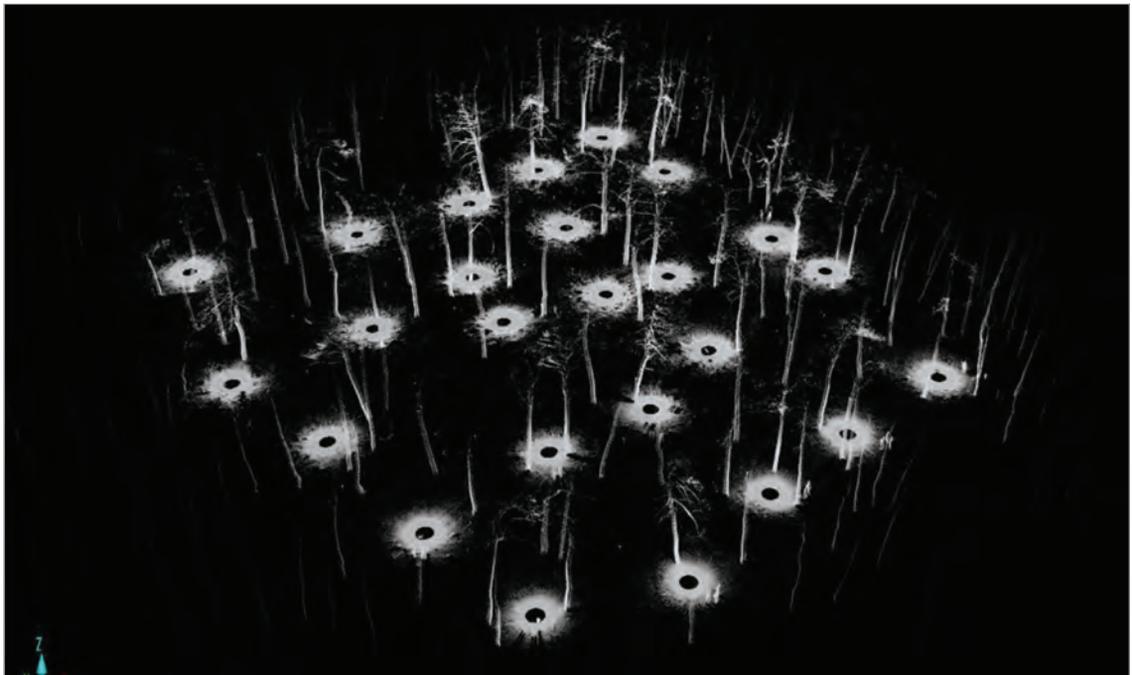
## 2.2 Procesado de datos

La correcta alineaci3n digital de las im3genes del esc3ner LiDAR tomadas en campo y su consiguiente conversi3n en nubes de puntos 3D se ha hecho a trav3s del programa inform3tico propio del esc3ner terrestre utilizado, llamado *FaroScene*. Versi3n 5.2 (*Fig. 3*), tras la cual se ha pasado a una segunda etapa de procesado a trav3s del programa *Polyworks* versi3n 12.1.3 (64 bits), el cual permite editar las nubes de puntos generadas y por tanto realizar las mediciones pertinentes. Con el programa *Polyworks* se editaron las nubes de puntos y se exportaron en formato .png. Para ello, primero se aislaron las nubes de puntos de cada uno de los 3rboles pertenecientes a cada parcela. Para el di3metro normal, se cre3 un plano de corte que cort3 a todos los 3rboles de cada parcela a 1.3 m de altura. Finalmente se cre3 un marco de referencia para que de esa manera, todas las im3genes estuviesen exportadas a la misma escala. Posteriormente, a trav3s del programa *Adobe Photoshop. CS* versi3n 8.0.1 se re-

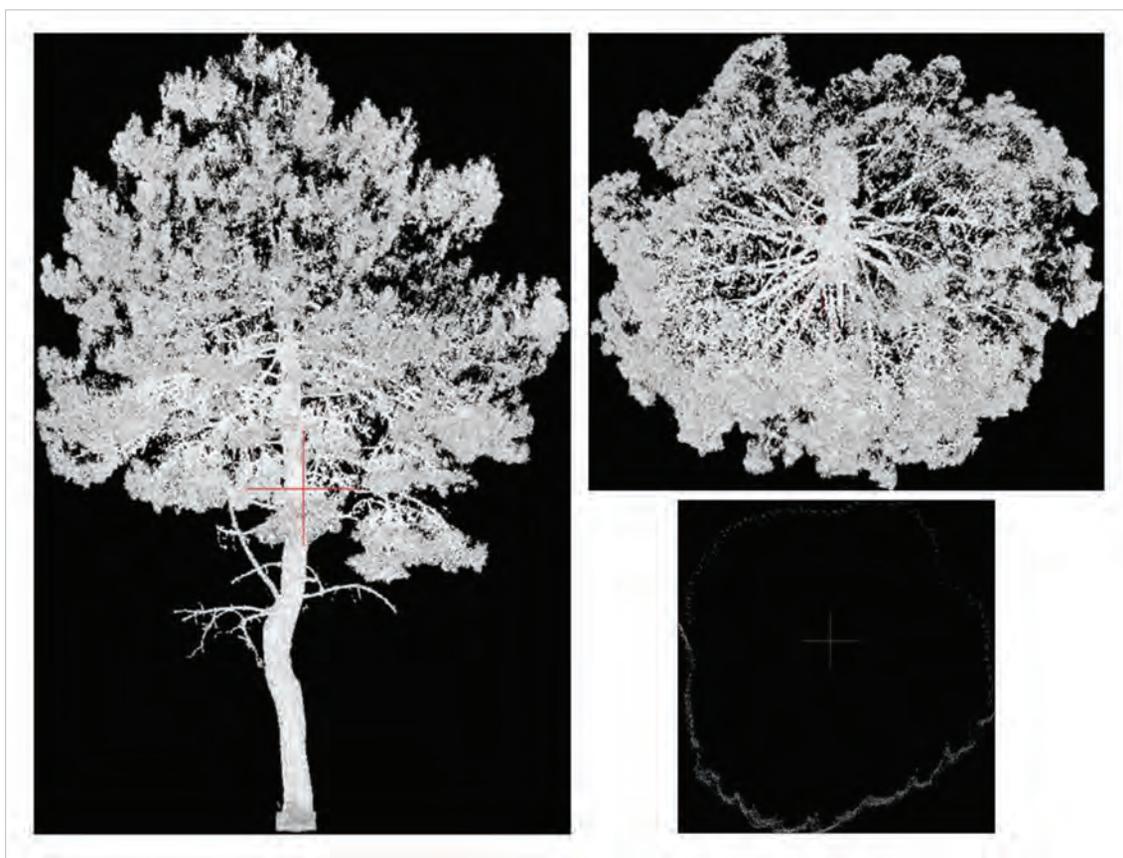


**Figura 2.** Captura de imagen del diseño en campo del vuelo a realizar por el RPAS a través del programa *MDCockpit*. El diseño del recorrido se encuentra representado por la línea roja.

cortaron y escalaron las imágenes de forma automática, consiguiendo que los píxeles de las imágenes se correspondiesen con las medidas reales del árbol (*Fig. 4*). A través de estas imágenes se midieron las variables diámetro normal, altura total, altura y anchura de copa y área basimétrica.



**Figura 3.** Visualización en perspectiva de una de las parcelas en el programa *Faroscene*, tras la alineación de los 25 escaneos realizados sobre ella.



**Figura 4.** Visualización de las imágenes exportadas desde *PolyWorks* de la vista de perfil y planta del árbol y sección del tronco a 1,3 m de altura.

Las imágenes fotogramétricas obtenidas con el RPAS fueron procesadas con el programa *Agisoft PhotoScan Professional* (64 bit) versión 1.0.3, que permite el cálculo automático de las orientaciones de cámara y parámetros ópticos de las lentes. Se obtienen así nubes de puntos similares a las producidas por los sistemas LiDAR a partir de la correlación masiva de píxeles en imágenes con regiones de superposición. Para poder editar las nubes de puntos generadas, se exportaron al programa *Polyworks*, ya descrito. Con esta metodología solamente se midió la variable altura total de árboles (*Fig. 5*).

### 2.3 Análisis de datos

Para cada variable se ha ajustado un modelo lineal simple (con programa estadístico *SAS 9.2*) para comprobar la igualdad de los valores de las medidas tomadas con las tecnologías alternativas LiDAR terrestre y Fotogrametría con respecto a los valores obtenidos de forma convencional. Para ello el modelo utilizado tenía la siguiente estructura:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * X + \varepsilon$$

Donde Y es el valor de las medidas obtenidas convencionalmente y X el valor ob-



**Figura 5.** Captura de imagen del programa Polyworks, que permite medir en metros la distancia existente entre dos puntos.

tenido mediante LiDAR terrestre o fotogrametría según el caso  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son el término independiente y la pendiente de la recta de regresión y  $\varepsilon$  representa el término de error aleatorio del modelo, verificando las hipótesis de normalidad, media cero, varianza constante e independencia de los mismos.

Para comprobar que las mediciones convencionales y los procedimientos alternativos (LiDAR o Fotogrametría) eran iguales, se realizó el contraste conjunto  $H_0: \beta_0 = 0, \beta_1 = 1$ . En los casos en los que resultó significativo (i.e. se detecten diferencias significativas) se realizó el test  $H_0: \beta_1=1$  para detectar la razón de la diferencia.

### 3. Resultados

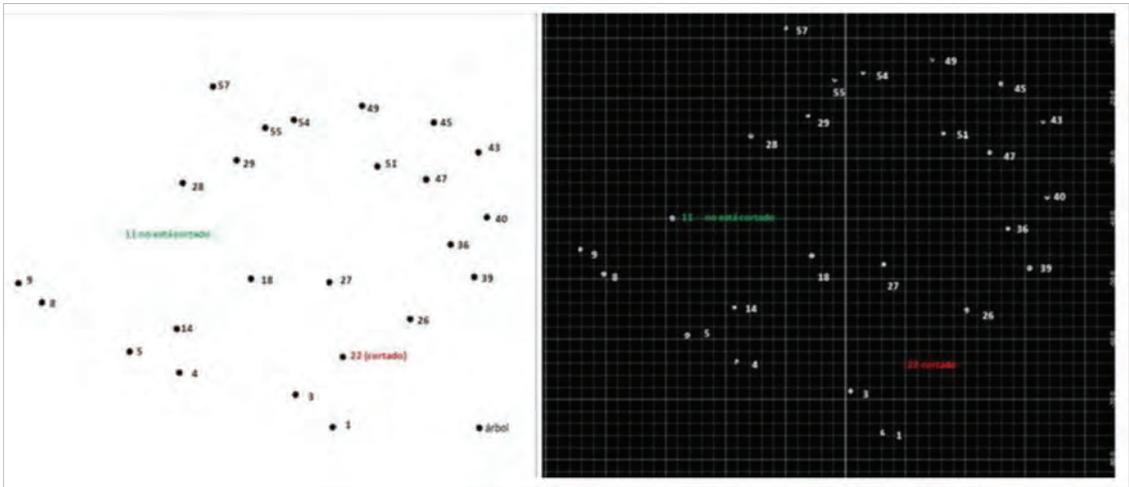
A partir del análisis de los resultados se observa una correspondencia razonable entre las tecnologías alternativas y la convencional (*Tab. 1, Tab. 2*). El test conjunto se cumple ( $p$ -valor  $> 0.05$ ) para las variables altura, altura de copa y área basimétrica, es decir, estas medidas tomadas con las tecnología LiDAR terrestre resultan no significativamente distintas a las medidas convencionales. Sin embargo, el test muestra que las medidas son significativamente distintas para el diámetro normal, la anchura de copa medidas con LiDAR terrestre y la Altura total medida a través de fotogrametría. Los resultados del test individual sobre la pendiente para estas tres medidas, muestran que dicha igualdad se cumple para la anchura de copa y para la altura total, pero no así para el diámetro normal. Por otro lado, se observó que el LiDAR terrestre permite la georreferenciación de los arboles (*Fig. 6*) y la representación (en 3D) adecuada de los árboles (*Fig. 7*).

**Tabla 1.** Estadística descriptiva de las diferentes variables medidas con técnicas manuales (hipsómetro Vertex III y forcípula), LiDAR y Fotogrametría. La tabla muestra: Número de árboles medidos (N), media ( $\bar{x}$ ), valor máximo (Máx), mínimo (Mín) y su desviación estándar (s). Para el caso de la altura medida a través de fotogrametría, el número de pies medidos a través de Vertex III son una submuestra de los 102 árboles de la primera columna.

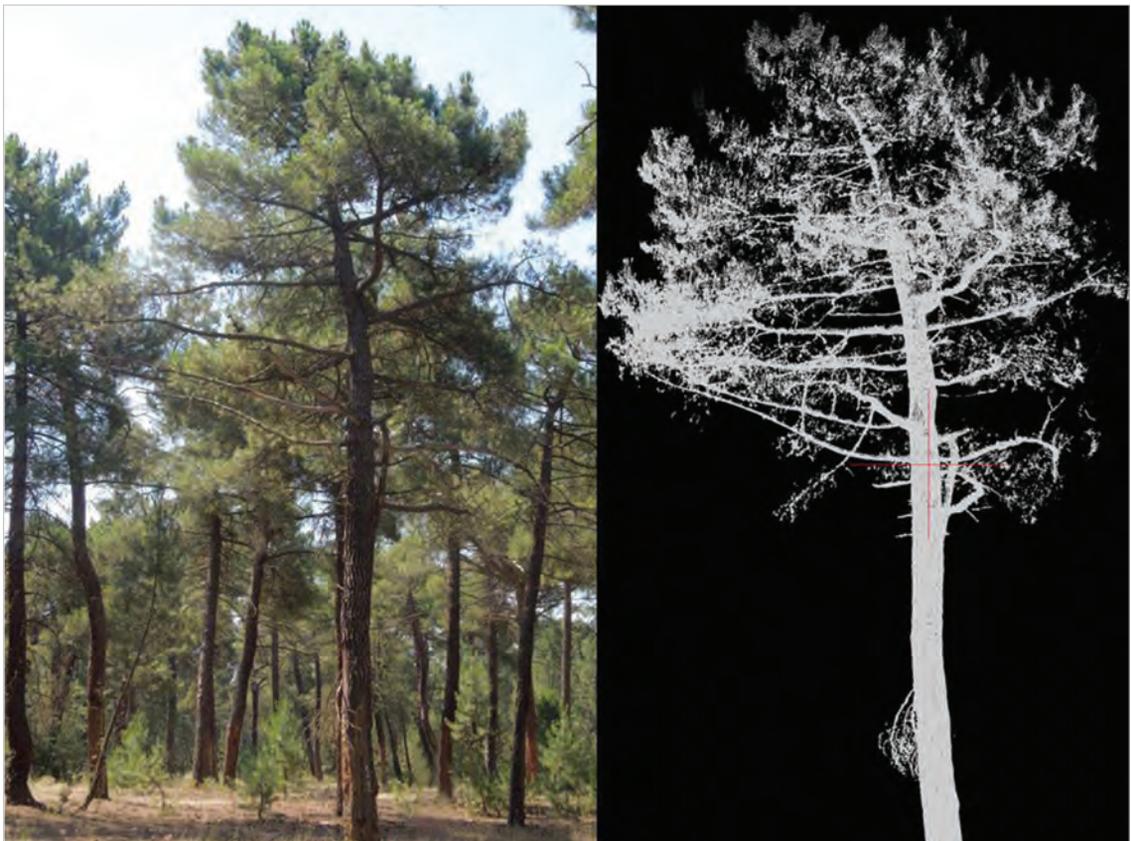
	Altura (m)				Diámetro Normal (cm)		Altura copa (m)		Anchura copa (m)		Área basimétrica (m <sup>2</sup> /ha)	
	Vertex III	LiDAR	Vertex III	Fotogrametría	Forcípula	LiDAR	Vertex III	LiDAR	Cinta métrica	LiDAR	Forcípula	LiDAR
n	102	102	87	87	100	100	54	54	53	53	15	15
$\bar{x}$	15.58	15.52	15.59	14.75	49.00	48.38	8.37	8.43	8.69	9.62	85.35	85.80
máx	21.40	19.45	21.70	18.68	79.15	81.70	13.10	14.32	14.30	13.83	163.06	162.79
mín	7.20	7.56	7.20	7.08	11.50	9.50	4.70	4.83	2.30	3.20	21.85	17.24
s	2.51	2.01	2.82	2.06	11.70	13.06	2.10	1.92	2.33	2.38	46.16	45.55

**Tabla 2.** Resumen de los resultados estadísticos más característicos del modelo. En cada columna se especifica la variable dasométrica a la que hace referencia y por filas la significación de los modelos, los parámetros estimados y su significación, los test conjuntos sobre los parámetros y el test individual sobre la pendiente y, por último, el test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov sobre los residuos del modelo.

	LiDAR Terrestre					Fotogrametría
	Altura	Diámetro Normal	Anchura copa	Altura copa	Área Basimétrica	Altura
Modelo de Regresión Lineal						
F-Valor	237.090	1212.900	174.650	56.950	568.120	113.360
p_valor	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
R <sub>2</sub> (%)	70.540	95.440	77.060	52.750	97.760	57.440
Estimador del parámetro						
b <sub>0</sub>	-0.744	5.222	-0.034	1.548	-0.627	0.562
b <sub>1</sub>	1.054	0.887	0.897	0.808	1.002	1.025
p_valor significación del parámetro						
H <sub>0</sub> : b <sub>0</sub> = 0	0.489	0.000	0.959	0.096	0.879	0.696
H <sub>0</sub> : b <sub>1</sub> = 0	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
p_valor test conjunto						
H <sub>0</sub> : b <sub>0</sub> = 0, b <sub>1</sub> = 1	0.591	<0.000	<0.000	0.205	0.970	<0.000
p_valor test sobre la pendiente						
H <sub>0</sub> : b <sub>1</sub> = 1		<0.000	0.135			0.797
Test de normalidad Kolmogorov-Smirnov						
Estadístico D	0.059	0.103	0.066	0.093	0.143	0.061
p_valor	>0.150	0.113	>0.150	>0.150	>0.150	>0.150



**Figura 6.** Comparación de la obtención del posicionamiento georreferenciado en una de las parcelas estudiadas. La imagen de la derecha representa la georreferenciación obtenida a través de una estación total, y la imagen izquierda la georreferenciación obtenida a través del LiDAR terrestre. El árbol 11 marcado en verde es un árbol no cortado que en la georreferenciación tradicional se marcó como cortado. Por el contrario el árbol 22, marcado en rojo resultó ser un árbol cortado no marcado como tal en la georreferenciación a través de la estación total.



**Figura 7.** Representación del árbol 11 de la parcela 2, en 3D a través de la tecnología LiDAR terrestre.

## 4. Discusión

El LiDAR terrestre es una gran herramienta de trabajo para la evaluación métrica del bosque (Hopkinson *et al.*, 2004) ya que representa en gran detalle la morfología de los árboles, lo cual lo hace susceptible de poder ser utilizado como un buen instrumento para la modelización de crecimiento de los mismos (Moskal *et al.*, 2009). Sin embargo, como se muestra en este trabajo, es necesario mejorar y desarrollar técnicas de identificación automática, así como de extracción de datos (Hopkinson *et al.*, 2004) ya que, mientras la adquisición de datos en campo de nubes de puntos 3D LiDAR es prácticamente inmediata (en apenas minutos) el posterior procesado de datos lleva demasiado tiempo, como también comenta Xu *et al.* (2013). Por ello es preciso el desarrollo de algoritmos específicos que hagan posible la eliminación de forma automática y sencilla del volumen excesivo de los datos que LiDAR recolecta, en ocasiones, de nula utilidad y que ralentizan la obtención de resultados. La cantidad de información útil contenida en la exploración también disminuye cuando el árbol presenta una densidad alta de follaje o de ramificación, así como cuando la densidad de árboles existentes en la parcela de estudio es alta (Watt, 2005).

Tal y como Hopkinson (2004) describe en su trabajo, en este trabajo se ha observado que el LiDAR terrestre es capaz de representar de forma precisa información sobre la ubicación del tronco y la altura del árbol. Esto se traduce en un gran ahorro de tiempo y aumento de precisión en la georreferenciación de los árboles (*Fig. 6*). Con las características de ser objetivo, preciso y eficiente, el LiDAR terrestre es una buena herramienta para la observación y punto de referencia para la caracterización precisa de la arquitectura vegetal, ayudando así a mejorar la eficiencia de la supervisión de la masa y de la gestión forestal (Xu *et al.*, 2013).

La falta de correlación en las mediciones del diámetro normal puede ser debido a varios factores: (1) la altura a la que se realiza la medida a través del LiDAR es exactamente a 1.3 m de altura, mientras que en campo ese valor es aproximado; (2) las malformaciones de los troncos, debida a la antigua actividad de resinación practicada sobre ellos, que ocasiona grandes variaciones de diámetro en escasos cm o (3) los ángulos desde los que se toman los diferentes escaneos y el efecto sombra de los propios árboles, ocasionando pérdida de información, (Moskal *et al.*, 2009) junto con la incapacidad del programa Polyworks a adaptarse a las curvaturas del eje de cada uno de los árboles, como ya comenta Xu *et al.* (2013). Para la anchura de copa, la ecuación obtenida a través del modelo lineal indica que la diferencia de resultados entre una técnica y otra aumenta a medida que la anchura de copa es mayor probablemente como consecuencia de que la anchura de copa máxima se encuentra a mayor altura dificultando la medición convencional. La tecnología LiDAR es capaz de solventar este problema al permitir mover la nube de puntos en el espacio, consiguiendo así medidas más exactas e imparciales. Finalmente la falta de correlación entre las alturas totales medidas con hipsómetro y a través de la fotogrametría se debe probablemente a la falta de fotografías superpuestas necesarias para una buena reconstrucción en nubes de puntos 3D.

## 5. Conclusiones

El uso de tecnología LiDAR terrestre y fotogrametría en el ámbito forestal en España es muy reciente por lo que los resultados obtenidos en este estudio son significativos, pero no concluyentes. Sin embargo, se ha podido comprobar que estas nuevas tecnologías, que producen mediciones iguales a los métodos tradicionales, son métodos no agresivos con capacidad potencial de ofrecer un gran volumen de información de los bosques. La obtención de las nubes de puntos es relativamente rápida considerando la gran cantidad de información que con ellos se adquiere. Sin embargo se hace necesario mejorar el método de muestreo, para aumentar la eficacia del trabajo y el proceso de identificación e individualización de los árboles en el laboratorio, mediante el desarrollo de algoritmos capaces de automatizar dicho proceso. Otro punto a destacar es que a pesar de que hoy en día son equipos caros, el enorme potencial que guardan las convierte en instrumentos de trabajo muy rentables en el ámbito forestal.

## 6. Bibliografía

- Baltsavias, E., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. vol. 54, no. 2, pp. 83-94.
- Bell, J.F., Dilworth, J.R., 1998. *Variable probability sampling variable plot and Three-P*. O.S.U. Book Stores, Inc., Corvallis, Oregon.
- Bravo, F., Del Peso, C., Rodríguez, E., Ordoñez, C., Ruano, I., De Lucas, A.I., 2012 Sitios experimentales y redes de parcelas para la investigación sobre regeneración natural de *Pinus pinaster* Ait. gestionados por la Universidad de Valladolid. En: Gordo, J., Calama, R., Pardos, M., Bravo, F., Montero, G. (eds.), *La regeneración natural de los pinares en los arenales de la Meseta Castellana*. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA). Valladolid, pp. 67-79.
- Holgate, P., 1967. The angle-count method. *Biometrika*, 54 (3-4), pp.615-623.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C., Treitz, P., 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning LiDAR. *Canadian Journal of Forest Research*. vol. 34, no. 3, pp. 573-583.
- Moskal, M., Erdody, T., Kato, A., Richardson, J., Zheng, G., Briggs, D., 2009. Lidar applications in precision forestry. *Proceedings of Silvilaser*, pp. 154-163.
- Uzquiano, S., 2014. *Mediciones dendrométricas y dasométricas mediante técnicas LiDAR y fotogramétricas*. Proyecto Fin de Máster de Ingeniería de Montes. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid. (Disponible en línea en <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/6587>).
- Watt, P.J, Donoghue, D.N.M., 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*. vol. 26, no. 7, pp. 1437-1446.
- Xu, W., Su, Z., Feng, Z., Xu, H., Jiao, Y., Yan, F., 2013. Comparison of conventional measurement and LiDAR based measurement for crown structures. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 98, pp. 242-251.