



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-095

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Caracterización dasométrica y cubicación de *Eucalyptus globulus* mediante Láser Escáner 3D

ARMESTO, J.¹ y PICOS, J.²

¹ Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Vigo, Campus A Xunqueira s/n CP 36005 Pontevedra. julia@uvigo.es

² Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Vigo, Campus A Xunqueira s/n CP 36005 Pontevedra. jpicos@uvigo.es.

Resumen

La base de todo proceso de gestión forestal reside en la caracterización de la masa y el inventario de existencias. Estos se realizan habitualmente a partir de la medición de variables dasométricas en un número representativo de parcelas de muestreo distribuidas de forma aleatoria por la masa forestal. Los profesionales vinculados a la gestión forestal tienen ante sí el reto de aprovechar las nuevas tecnologías mejorar la toma de decisiones y la eficiencia en las explotaciones forestales. El Láser Escáner Terrestre constituye una interesante alternativa a los métodos tradicionales. Permite acometer la medición de las variables dasométricas características en parcelas de inventario de forma rápida, objetiva y precisa. Pero además, la posibilidad de caracterizar diámetros a diferentes alturas a través de la nube de puntos abre nuevos horizontes en el modo de caracterizar los árboles en pie, evaluar calidades o cubicar. Este artículo presenta casos prácticos de aplicación de láser escáner terrestre en la caracterización de masas forestales contrastando los resultados con métodos tradicionales de inventario y con medidas obtenidas en los pies apeados.

Palabras clave

Láser escáner terrestre, nubes de puntos, inventario forestal, caracterización dasométrica.

1. Introducción

Todo sistema de planificación y gestión forestal se sustenta en la captura y análisis de información del recurso forestal existente. Esta información es esencial para soportar la toma de decisiones a diferentes niveles, ya sea las actuaciones selvícolas necesarias, el aprovechamiento del recurso, las medidas de gestión, etc. El principal objetivo de un inventario forestal es medir el volumen de madera, la biomasa o la diversidad, así como los cambios en estos atributos. La mayor parte de los inventarios forestales se basan en la realización de parcelas de muestreo, y los datos resultantes se emplean para inferir parámetros globales de la masa de interés. La precisión de los datos globales derivados del inventario va a depender de la calidad y la cantidad de la muestra tomada.

Las parcelas de muestreo forestal son típicamente pequeñas áreas de forma circular y radios comprendidos entre los 4 y los 15 metros. La información se toma realizando medidas de cada pie. La principal información tomada son los atributos por pie: especie, diámetro nominal y altura total. Posteriormente se obtienen las medidas por parcela y se infieren los valores poblacionales considerando el tamaño de parcela frente a la superficie total de la masa. Los instrumentos convencionales para la medición de las parcelas de muestro son forcípulas y clinómetros. La evolución en las últimas décadas de estas herramientas ha consistido en la incorporación de lectores digitales, memorias internas y sistemas de transmisión de datos. La aparición del láser escáner terrestre constituye una oportunidad extraordinaria de tecnificar los procesos de inventario forestal.

Hay una serie de aspectos fundamentales que condicionan la incorporación de una nueva tecnología de medición de pies forestales en parcelas de inventario: el coste de adquisición de datos

debe ser abordable; este factor depende del coste de los equipos, el coste de la toma de datos en campo y del procesamiento de los mismos. Por otra parte la precisión en la estimación de las variables de inventario debe ser equiparable o superior a la estimación mediante técnicas tradicionales. Finalmente la técnica debería facilitar la documentación de variables que son importantes para la toma de decisiones en la gestión forestal. Al reproducir digitalmente los árboles, el láser escáner ofrece una documentación muy completa que no está al alcance de los métodos tradicionales.

El láser escáner es un sistema de barrido masivo de puntos que mide automáticamente millones o billones de puntos del entorno. Es una técnica que no requiere contacto con el objeto a medir, no es destructiva ni invasiva. Consiste en emitir un haz de luz láser con una elevada tasa de repetición (MHz); el haz es reflejado mediante un espejo rotatorio u oscilante con un cierto intervalo angular y al hacer rotar el sistema sobre su eje vertical se consigue proyectar el haz en todas las direcciones del espacio. Por su capacidad para documentar el entorno rápidamente, de forma automática y con detalle milimétrico, los sistemas TLS se han empleado como instrumento topográfico desde su aparición en la década de los noventa en muy diversas aplicaciones. En Castagnetti et al. (2012) se muestra una aplicación a documentación y caracterización de elementos patrimoniales, Alejano et al. (2010) a la monitorización de taludes, Bonfanti et al. (2013) al modelado de edificios, Castelazzi et al. (2015) al análisis estructural de construcciones.

Los TLS empezaron a ensayarse en inventarios forestales en la primera década del milenio con el objeto de mejorar la eficiencia en los muestreos y reemplazar las medidas manuales por datos objetivos (Hopkinson et al., 2004; Henning y Radtke, 2006). Recientemente los sistemas TLS han empezado a aplicarse no solo en la documentación de las variables dasométricas tradicionales, sino también otros parámetros como volumen de fuste o biomasa de fuste y ramas (Liang et al. 2014), Además se están desarrollando métodos de procesamiento automático de nubes de puntos (Wang et al. 2017). Finalmente, el láser escáner permite analizar estudios temporales ya que las parcelas pueden ser remuestreadas cada cierto tiempo (Srinivasan et al. 2014).

2. Objetivos

El objeto de este trabajo es mostrar el potencial del láser escáner terrestre en la caracterización dasométrica de pies en parcelas forestales de muestreo. Se presentan casos prácticos de estudio donde las medidas realizadas con TLS se contrastan con medidas realizadas por procedimientos tradicionales de inventario. La sección 3 presenta el sistema láser escáner. El apartado 4 describe el caso de estudio. En la sección 5 se describe la metodología de toma de datos y procesamiento. El apartado 6 presenta y analiza los resultados obtenidos. El último apartado presenta las conclusiones del estudio.

3. Láser escáner terrestre

Un láser escáner terrestre (TLS, siglas en inglés de *Terrestrial Laser Scanner*) consiste básicamente en un sistema de emisión de luz láser, un sistema de deflexión del haz, y un sistema de recepción. El equipo opera midiendo la distancia recorrida por el haz láser desde el momento preciso de su emisión hasta la incidencia en un objeto del entorno, incluyendo el recorrido de retorno de la señal al instrumento. Asimismo se mide la posición angular del mecanismo de deflexión del haz, de modo que en tiempo real se generan las coordenadas polares 3D del punto de incidencia del haz respecto al centro óptico del TLS. Debido al desarrollo de la electrónica en los últimos años, los sistemas comerciales TLS alcanzan actualmente tasas muy elevadas de emisión del haz, de modo que en pocos minutos se pueden medir las coordenadas 3D de millones de puntos del entorno del equipo. En Vosselman y Maas (2010) se incluye una descripción completa de los principios de medición y las tipologías de instrumentos.

En el presente estudio se ha empleado un láser FARO Focus 3D. Se trata de un sistema basado en medición de distancias por comparación de fase, esto es, mediante modulación de la onda y medición a alta frecuencia. Típicamente, estos equipos son más ligeros, rápidos y precisos que los sistemas basados en medición de tiempo de vuelo. Por contra el alcance es menor (entre 80 y 130 metros). No obstante, dados los diámetros de parcela habitualmente empleados en inventario forestal, este no es un factor limitante. El equipo Faro Focus 3D opera a 1MHz, mide puntos con una precisión de +/-2 mm (en targets a 25m), tiene un alcance de 120m y un campo de visión de 360° (vertical) x 305° (horizontal).

4. Casos de estudio

El caso de estudio seleccionado es una parcela emplazada en el municipio costero de Sanxenxo, provincia de Pontevedra (ver Figura 1), poblada con *Eucalyptus globulus*. La parcela estaba emplazada en un masa de 15 a 20 años de edad destinada a corta, sin marco de plantación, apareciendo con frecuencia 2 o más pies por cepa. Se midieron las variables dasométricas convencionales de diámetro nominal y altura total con forcípula y Blume-Leiss. Además, se midieron los diámetros de los pies apeados a intervalos de 2m con cinta Pi.



Figura 1. Emplazamiento de las parcelas de muestreo para caracterización dasométrica con TLS.

5. Metodología

La caracterización dasométrica mediante TLS comporta una serie de fases: diseño de la red de estaciones, adquisición de los datos, registro de nubes de puntos, depuración de datos, caracterización dasométrica y verificación. El número y emplazamiento de los estacionamientos de escaneo busca por una parte minimizar el tiempo de toma de datos en campo, maximizar la precisión en los datos tomados, y optimizar el recubrimiento de los objetos. Dado que estos parámetros se contraponen entre sí, habrá que llegar a soluciones de compromiso en cada caso. El tiempo invertido en el levantamiento de campo es directamente proporcional al número de estacionamientos, la resolución de escaneo, esto es, el paso angular entre la emisión de haces consecutivos, y la repetición de las medidas. La precisión de los datos tomados es inversamente proporcional a la distancia instrumento-objeto, y depende también del ángulo de incidencia o las características de la superficie. Finalmente el recubrimiento de los objetos a medir depende del número de escaneos y de

las oclusiones. En el levantamiento de parcelas forestales, las oclusiones constituyen un factor de gran peso. La abundancia de vegetación de sotobosque, o los propios fustes, hojas y ramas de los pies a medir proyectan sombras que pueden dificultar la obtención de retornos de las superficies de interés. En la Figura 2 se muestran como guía la red de estacionamientos a disponer según la densidad de pies de la parcela, considerando ausencia de sotobosque.

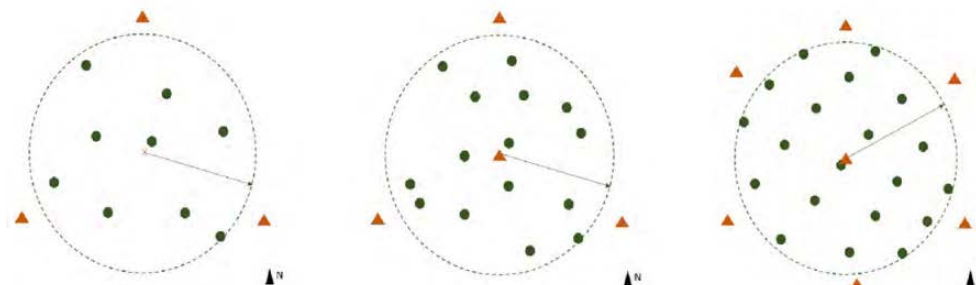


Figura 2. Red de estacionamientos TLS según la densidad de pies por parcela: 400-600 pies/ha (izquierda); 600-1000 pies/ha (centro); 1000-1500 pies/ha (derecha).

En los casos de estudio la resolución de las nubes tomadas es de 6 mm a los 10 metros. El tiempo total requerido en cada estacionamiento ha sido de unos 13 a 15 minutos, incluyendo los cambios de estación y desplazamiento. La toma de datos ha ido precedida de un proceso de preparación de la parcela, que incluye un desbroce ligero y el diseño de la red de estacionamientos (ver Figura 3). Habitualmente este proceso comporta 30 a 45 minutos.



Figura 3. Láser escáner terrestre FARO Focus 3D.

Dado que la documentación de los fustes y copas completas requiere la aplicación de soluciones multiestación, es preciso acometer un proceso de registro. Este proceso consiste en la estimación de los parámetros de traslación y rotación que es preciso aplicar a cada nube de puntos medida para referirlas todas ellas al mismo sistema de coordenadas. Este procedimiento puede realizarse de modo manual (el más común) o automático (mediante el reconocimiento de elementos comunes en nubes consecutivas). Los métodos automáticos tradicionales de ajuste de planos no pueden aplicarse en entornos vivos como son los forestales, donde abundan los elementos móviles e irregulares (hojas, ramas, etc). Se han desarrollado algunos métodos pero solo aplicables en

instrumentos dotados internamente de clinómetro y brújula (Zhang et al. 2016). El método manual consiste en la utilización de targets o elementos de registro (dianas planas o esféricas); es el método empleado en el presente estudio. Las dianas son detectadas automáticamente en la nube de puntos, estimando el centro de las mismas, y empleando estos puntos como puntos de atado entre nubes sucesivas.

El proceso de depuración de la nube comporta la eliminación automática de puntos aislados y manual de todos aquellos elementos de la escena que no son objeto de estudio. El resultado es la nube de puntos restringida a los pies que pertenecen a la parcela bajo estudio (ver Figura 4).

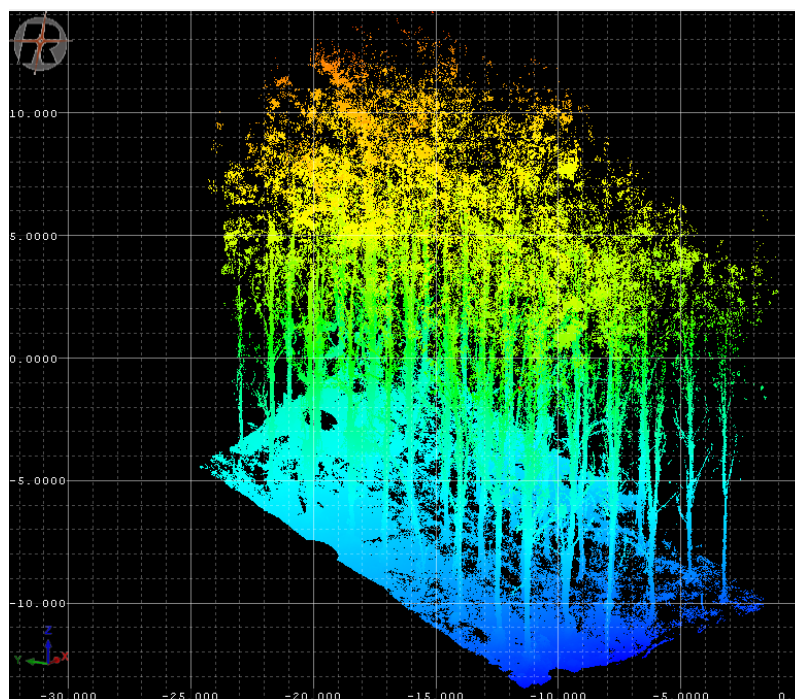


Figura 4. Nube de puntos global de parcela

Para proceder a la caracterización dasométrica, se procede a aplicar una paleta arco iris según los valores de Z de la nube de puntos de la parcela, de modo que las copas aparecen en tonos cálidos mientras que el suelo y partes bajas de los pies aparecen en tonos fríos. Esto permite reconocer y aislar cada uno de los pies del resto de la masa. Una vez individualizados se toman puntos al pie del fuste en el punto de arranque del suelo, y en el punto más alto de la copa, de modo que se puede medir la distancia entre ellos obteniendo la altura del pie (ver Figura 5). Asimismo, superponiendo un grid graduado a la vista frontal pie, es posible realizar la medida del diámetro nominal a 1,3 metros del suelo (ver Figura 6). Esta medida se repite en dos vistas ortogonales entre sí, a fin de disponer de una mejor aproximación del diámetro medio del árbol (ver Figura 7).

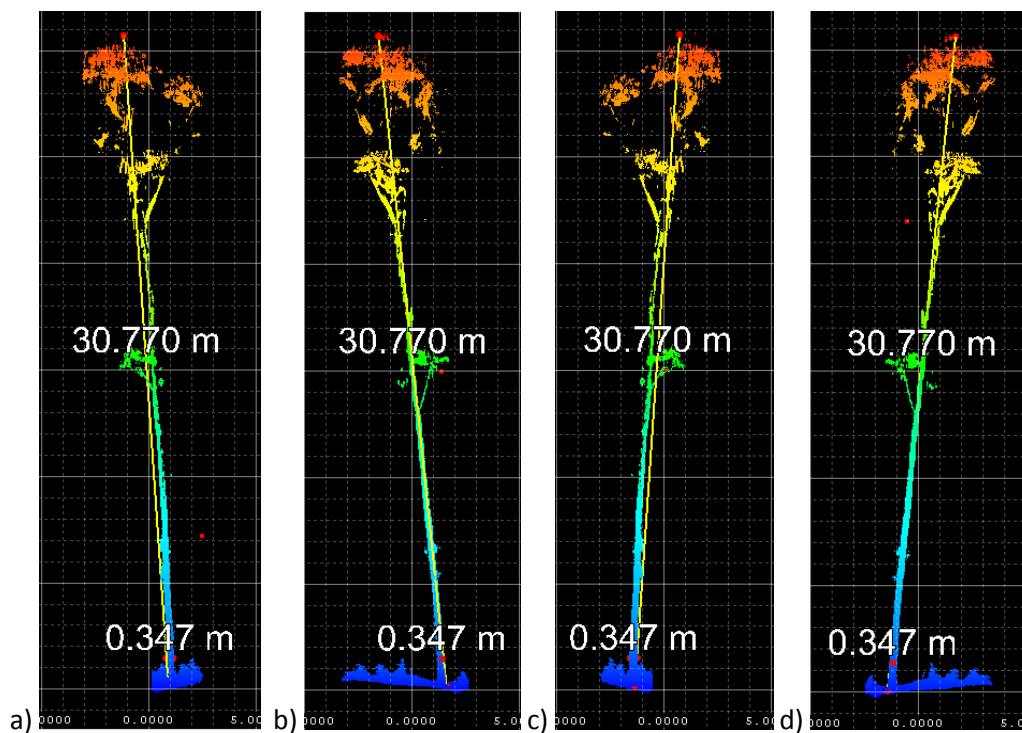


Figura 5. Medición de altura total y diámetro a 1,30 m en un pie de eucalipto: rotación del pie sobre el eje del fuste, alzado anterior (a), perfil izquierdo (b), alzado posterior (c), perfil derecho (d).

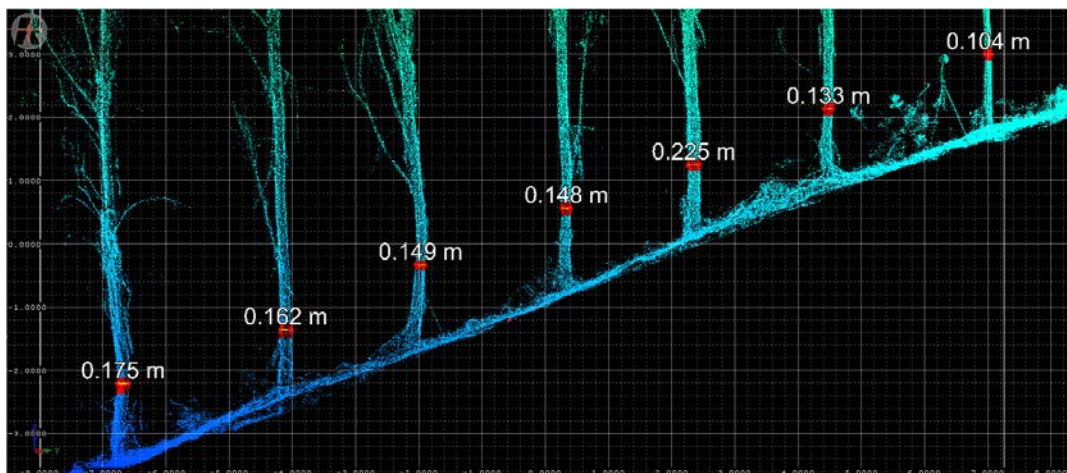


Figura 6. Medida de diámetros a nivel 1,30m en varios pies.

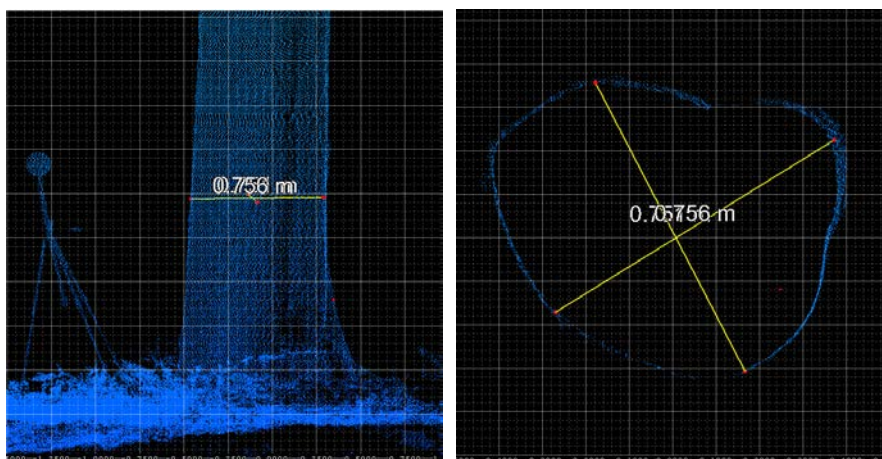


Figura 7. Medición de diámetro nominal con realización de dos lecturas ortogonales. Vista en alzado (Izquierda) y selección de puntos distales a $Z=1,30\text{m}$; sección de la nube de puntos a nivel $1,30\text{m}$ de 20cm de espesor, vista en planta, proyección ortogonal (derecha).

La verificación de los atributos medidos se hizo mediante la comparación con las alturas totales y diámetros nominales medidos por procedimientos tradicionales con una forcípula y un hipsómetro Blume Leiss. Además se midieron los diámetros a lo largo del fuste a intervalos de 2 metros tras el apeo de los pies.

6. Resultados y discusión

Para la parcela de estudio se midieron 22 pies de eucalipto con diámetros nominales comprendidos entre los 12,5 y los 48,8 metros (ver tabla 1), y alturas entre 14 y 31 metros (ver tabla 2). La relación alturas-diámetros se ajusta mediante funciones logarítmicas; se muestran en la Figura 8 las fórmulas de ajuste, junto con los R^2 obtenidos. De los resultados se deriva que no se aprecian diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones realizadas con láser escáner y con métodos convencionales. Es interesante señalar además que el 86,4% de los valores de diámetro arrojan errores relativos inferiores al 10%; en el caso de las alturas, se trata del 77,3%. Hay que tener en cuenta que la estimación de alturas está sometida a mayores fuentes de error tanto en el procedimiento convencional, por la necesidad de discriminar visualmente el ápice de copa, como en la nube de puntos, por estar este atributo más afectado por las oclusiones.

Tomando como base las variables dasométricas del inventario se estimaron los volúmenes de cada pie según la fórmula del Inventario Forestal Nacional 4 para la especie (ver tabla 3). Se representaron los datos de volúmenes por pie obtenidos en base a los métodos tradicionales de inventario frente a las estimaciones obtenidas con el láser escáner. El R^2 obtenido es elevado: 0,9523. Asimismo se estimó el volumen por trozas empleando la fórmula de Smalian (ver tabla 4). En este último caso, la capacidad para caracterizar la totalidad del fuste ha sido variable. En el 36% de los casos se ha podido caracterizar más del 50% de las trozas del fuste. En el resto de los casos las oclusiones que las ramas, el sotobosque o fragmentos de corteza proyectan han impedido caracterizar correctamente el fuste de los pies. Una limitación de peso en la caracterización dasométrica que se ha observado para esta especie es el elevado nivel de interferencia del viento en la calidad de la nube de puntos. La flexibilidad de la madera hace que niveles reducidos de viento introduzcan movimientos sensibles en las copas. Este efecto se traduce en la aparición de ondas en la nube de puntos que imposibilitan la caracterización del fuste en altura.

Tabla 1. Caracterización de diámetros nominales con láser escáner 3D y métodos convencionales.

Diámetro nominal (cm)	Promedio	RMSE	Dn min	Dn max
TLS	29,4	12,1	12,4	48,9
Forcípula	29,8	12,2	12,5	48,8

Tabla 2. Caracterización de alturas totales con láser escáner 3D y métodos convencionales.

Altura total (m)	Promedio	RMSE	Hmin	Hmax
TLS	25,0	5,8	14,7	31,6
Hipsómetro	24,2	5,3	14,0	31,0

Tabla 3. Estimación volumétrica con láser escáner 3D y métodos convencionales.

Volumen IFN4 (m ³)	Promedio	RMSE	Vmin	Vmax	Vtotal
TLS	0,768	0,621	0,080	1,937	16,902
Hipsómetro	0,751	0,605	0,076	1,817	17,276

Tabla 4. Estimación volumétrica por trozas con láser escáner 3D y métodos convencionales.

Volumen Smalian (m ³)	Troza promedio	RMSE	Vtotal
TLS	0,119	0,07	11,865
Cinta Pi	0,127	0,08	12,707

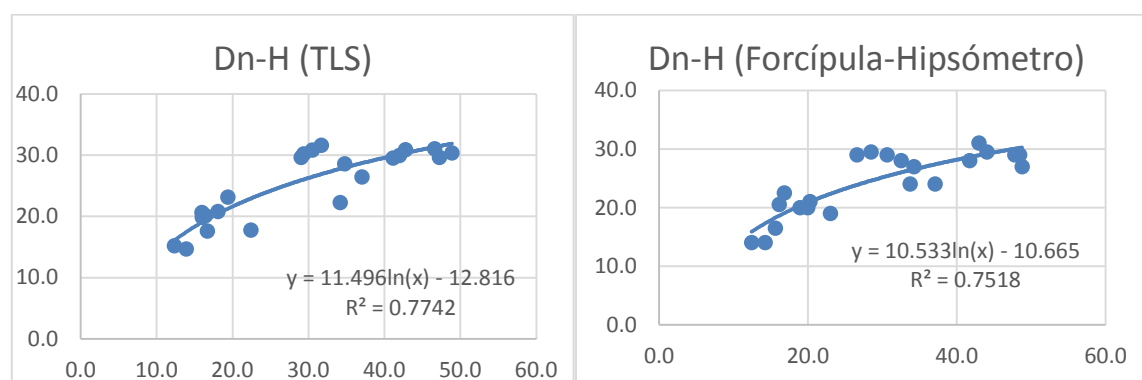


Figura 8. Relación H-Dn para el inventario realizado con láser escáner (izquierda) y con métodos tradicionales (derecha). Se muestran las funciones de ajuste y los coeficientes R2.

7. Conclusiones

Este artículo describe un caso práctico de aplicación de la tecnología láser escáner terrestre a la caracterización dasométrica de pies de eucalipto en una parcela de inventario forestal. Se muestran los resultados para la estimación de diámetros nominales, alturas totales y volúmenes. Los errores relativos son inferiores al 10% en el 86% de los diámetros nominales estimados, y en el 77% de las alturas estimadas. Se ha detectado que para esta especie el viento tiene una incidencia muy elevada en la calidad de la nube de puntos reconstruida debido a la elevada flexibilidad de los fustes de eucalipto.

A pesar de que en la última década se ha llevado una intensa investigación en la comunidad científica internacional en la aplicación de la tecnología láser escáner al sector forestal, todavía no se han desarrollado protocolos definitivos que permitan integrar esta herramienta en los procesos de

inventario forestal. Esto es válido para la esfera internacional, pero de forma especial en el ámbito nacional. La ausencia de herramientas que permitan la obtención de atributos de forma automática, el coste todavía elevado de los instrumentos, o la falta de personal especializado son algunas de las trabas que frenan su expansión. Además, es preciso adaptar los paradigmas de análisis de masas forestales para aprovechar el potencial de esta herramienta. Sólo así la inversión podrá ser rentabilizada y la información explotada al máximo en beneficio de la gestión forestal.

8. Agradecimientos

Estos resultados han sido obtenidos en el transcurso de un trabajo desarrollado en el marco de la Cátedra Ence de la Universidad de Vigo.

9. Bibliografía

CASTAGNETTI, C.; BERTACCHINI, E.; CAPRA, A.; DUBBINI, M. 2012. Terrestrial laser scanning for preserving cultural heritage: analysis of geometric anomalies for ancient structures. *Proceedings of FIG2012 Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage*. 13pp.

BONFANTI, C; CHIABRANDO, F.; RINAUDO, F. 2013. TLS data for 2D representation and 3D modelling. Different approaches tested in the case of San Giovanni in Saluzzo (CN) Italy. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W1. 6pp.

CASTELLAZZI, G.; D'ALTRI, A. M.; BITELLI, G.; SELVAGGI, I.; LAMBERTINI A.; 2015. From Laser Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure. *Sensors* 15 (8), 18360–18380.

HOPKINSON, C.; CHASMER, L.; YOUNG-POW, C.; TREITZ, P.; 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Can. J. For. Res.* 34, 573–583.

HENNING, J.G.; RADTKE, P.J., 2006. Ground-based laser imaging for assessing three dimensional forest canopy structure. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72, 1349.

LIANG, X.; KANKARE, V.; YU, X., HYYPPA, J.; HOLOPAINEN, M., 2014. Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 52, 1739–1748.

WANG, D.; KANKARE, V.; PUTTONEN, E.; HOLLAUS, M.; PFEIFER, N; 2017. Reconstructing Stem Cross Section Shapes From Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.

SRINIVASAN, S.; POPESCU, S.C.; ERIKSSON, M.; SHERIDAN, R.D.; KU, N.-W.; 2014. Multitemporal terrestrial laser scanning for modeling tree biomass change. *For. Ecol. Manage.* 318, 304–317.

VOSSelman, G.; MAAS, H.G. (2010). Airborne and terrestrial laser scanning. Ed. Whittles. Dunbeath.

ZHANG, W.; CHEN, Y.; WANG, H.; CHEN, M.; WANG, X.; YAN, G.; 2016. Efficient registration of terrestrial LiDAR scans using a coarse-to-fine strategy for forestry application. *Agricultural and Forest Meteorology* 225, 8-23.