

Modelos 3D derivados de fotogrametría terrestre para la estimación de variables de inventario forestal

de Eugenio, A.¹, Fernández-Landa, A.², Merino-de-Miguel, S.^{1*}

¹ ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria s/n 28040, Madrid, España.

² Agresta S. Coop., C/ Numancia 1, 42001, Soria, España.

Resumen: La gestión eficiente de las masas forestales necesita de la medición de árboles individuales de manera precisa. A partir de dichas mediciones se elaboran ecuaciones y modelos que posteriormente pueden aplicarse a ejemplares de similares características, con el objetivo de estimar variables derivadas como el volumen maderable. De manera tradicional, la obtención de dichas mediciones requería el apeo de ejemplares. En este trabajo se evalúa una nueva metodología de medición, basada en la reconstrucción de modelos 3D de árboles mediante métodos fotogramétricos terrestres. Dentro del MUP (Monte de Utilidad Pública) n°39 (Madrid) se seleccionaron 4 parcelas, en cada una de las cuales se midieron y fotografiaron 5 pies. Para la medición se emplearon: forcípula, dendrómetro Criterion RD1000 e hipsómetro Vertex III. Las imágenes se tomaron con una cámara no métrica Canon IXUS 85 IS. A partir de las imágenes se construyeron modelos tridimensionales usando el software VisualSFM (*Structure from Motion*). Sobre esos modelos se realizaron posteriormente medidas por medio del software Meshlab. La evaluación se realiza a través de la comparación de los diámetros medidos en los modelos 3D con los obtenidos por medio de otra metodología de medición ya validada (usando el dendrómetro láser Criterion RD1000). No se encontraron diferencias significativas entre las mediciones realizadas con Criterion y las realizadas sobre el modelo 3D. La cubicación de árboles en pie por medio de métodos fotogramétricos es una alternativa fiable con potencial de desarrollo en los próximos años.

Palabras clave: árbol, fotogrametría, diámetro, cubicación, volumen maderable.

3D models from terrestrial photogrammetry in the estimation of forest inventory variables

Abstract: The management of forest resources should be based on reliable measurements of individual standing trees. At the beginning, these measurements allow us to estimate equations and models, which in turn are used to be applied to similar individuals with the objective of estimate variables such as timber volume at plot or stand level. Traditionally, these measurements required the destruction of several standing trees. The present work intends the construction of three-dimensional models of standing trees by terrestrial photogrammetry. With this purpose, four plots were sampled in the MUP n°39 (Madrid) in each of which 5 representative trees were measured and photographed. For the measurement of standing trees, we used: tree caliper, Criterion RD1000 dendrometer and Vertex III hipsometer. The images were taken with a non-metric Canon IXUS 85 IS camera. Three-dimensional models were constructed from the images using VisualSFM software. Subsequently, measurements were made on these models using Meshlab software. The evaluation is

To cite this article: de Eugenio, A., Fernández-Landa, A., Merino-de-Miguel, S. 2018. 3D models from terrestrial photogrammetry in the estimation of forest inventory variables. *Revista de Teledetección*, 51, 113-124. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.9174>

* Corresponding author: silvia.merino@upm.es

performed by comparing the diameters measured on the 3D models with those obtained by other validated measurement methodology (using the Criterion RD1000 laser dendrometer). No significant differences were found between those measurements made with the Criterion and those made on the 3D models. Wood volume estimation of standing trees using photogrammetry is a sound alternative with potential for the next years.

Key words: tree, photogrammetry, diameter, volume measurement, timber volume.

1. Introducción

La gestión eficiente y sostenible de los bosques depende directamente del diseño de políticas adecuadas, las cuales requieren contar con información precisa y sistemática que facilite la toma de decisiones a diversas escalas, y con una resolución temporal que permita valorar los resultados de esas políticas. Las masas forestales españolas ocupan aproximadamente el 36% del territorio (MAPAMA, 2017). Como ocurre con otros tipos de ecosistemas, su importancia radica fundamentalmente en la provisión de servicios ecosistémicos (recursos naturales, de regulación y recreativos) (Balvanera, 2012).

Dichos servicios, sobre los que existe en la actualidad una creciente preocupación derivada de los problemas ambientales e impactos antropogénicos que pueden ponerlos en peligro (De Araujo *et al.*, 2015; European Environment Agency, 2017), dependen de la estructura y estado de las masas forestales, habitualmente variables tanto en el espacio como en el tiempo (Cunliffe *et al.*, 2016). La adecuada gestión de las masas forestales deberá pasar por la estimación, con la periodicidad requerida, de lo que se denominan las existencias forestales, tradicionalmente ligadas al volumen maderable. Sin embargo, el cálculo de existencias permitirá no solo la evaluación de los recursos forestales y la valoración económica de la producción, sino también la posibilidad de cuantificar la biomasa almacenada, estimar las emisiones o fijaciones de gases de efecto invernadero (Fridman *et al.*, 2014), monitorizar la biodiversidad (Chirici *et al.*, 2012), o servir para la estimación de modelos de combustible y riesgo de incendio (Fernandes *et al.*, 2006).

La medición y caracterización de árboles (dendrometría) y masas forestales (dasometría) admite múltiples aproximaciones en función de los objetivos y de las precisiones que se deseen alcanzar (Liang *et al.*, 2016). Estas aproximaciones

abarcarían desde la realización un inventario forestal tradicional (consistente en el levantamiento de parcelas en campo con útiles clásicos) (Fridman *et al.*, 2014) hasta el uso de LiDAR aeroportado (también denominado *Airborne Laser Scanning*, ALS) (Hyypä *et al.*, 2008), pasando por el uso de otros sensores de teledetección, tanto activos (radar) como pasivos (Wulder, 1998), la utilización del LiDAR terrestre (también denominado *Terrestrial Laser Scanning*, TLS) (Liang *et al.*, 2016), o incluso de técnicas fotogramétricas, tal y como se propone en este artículo. De entre todas estas aproximaciones, el presente trabajo se centra en la estimación precisa de dos tipos de variables de inventario (diámetros y alturas) para el posterior desarrollo de ecuaciones de cubicación (tablas, tarifas y/o modelos de perfil) las cuales permiten, en una siguiente fase, el citado cálculo de existencias en masas forestales de características similares a las medidas para generar dichas ecuaciones.

La correcta cubicación de árboles resulta fundamental para el cálculo de las existencias. Para la cubicación de árboles en pie se utilizan modelos que predicen el volumen comercial a partir de variables dendrométricas. Las tablas y tarifas de cubicación clásicas ajustan con bastante precisión el volumen maderable total disponible, pero no proporcionan información sobre otros productos, cuya valoración se ha vuelto cada vez más importante, tanto para valorar económicamente la producción, como para cuantificar biomasa y CO₂ fijado (Wallace *et al.*, 2016). Como alternativa, se han desarrollado modelos basados en el cálculo del volumen hasta un determinado diámetro (o altura), como son las funciones de volumen porcentual o de razón, y los modelos de perfil (Manín Castro *et al.*, 2001). Las ecuaciones de cubicación construidas a partir de funciones de razón se consideran menos precisas que las construidas a partir de funciones de perfil, ya que el empleo de dos ecuaciones en las primeras provoca una multiplicación de errores. Esto ha llevado a que las

ecuaciones de cubicación de productos se basen principalmente en modelos de perfil (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003).

De manera tradicional, el desarrollo de las citadas ecuaciones de cubicación requería el apeo de árboles en pie, ya que se precisaba una medición muy detallada de una serie de ejemplares que solo podía realizarse derribando los individuos. Actualmente, existe un profundo interés por el uso de métodos indirectos o no destructivos, ya que éstos son más cómodos y económicos, están socialmente más aceptados y permiten igualmente la diferenciación de productos (Rodríguez y Fernández, 2009). Los métodos no destructivos que se emplean en la actualidad en el ámbito forestal son básicamente de dos tipos: (i) los basados en la construcción de modelos tridimensionales de árboles en pie sobre los que poder realizar cuantas mediciones sea preciso y, en menor medida, (ii) los basados en mediciones discretas pero frecuentes sobre árboles en pie mediante equipos de alta precisión (dendrómetros e hipsómetros láser). Por su parte, los modelos 3D suelen construirse utilizando: (i) LiDAR terrestre (también denominado: *Terrestrial Laser Scanning*, TLS) (Liang *et al.*, 2016), o (ii) fotogrametría digital terrestre automatizada, generalmente mediante algoritmos SfM (Structure from Motion) (Mikita *et al.*, 2016). El TLS presenta densidades mucho más elevadas que su variante aeroportada, el ALS, lo que, unido al hecho de evitar los problemas inherentes a una toma de datos cenital, permite un estudio más detallado de la estructura vegetal, a pesar de ciertas limitaciones debido a la oclusión que limitan precisamente la modelización de la parte superior de la copa (Vierling *et al.*, 2013). Por su parte, la fotogrametría mediante algoritmos SfM ha supuesto un enorme avance con respecto a la fotogrametría convencional ya que la geometría de la escena (posiciones de cámara y orientaciones relativas) se resuelve de manera automática a través de la identificación de puntos homólogos en un conjunto de imágenes con solape (Westoby *et al.*, 2012) y además puede realizarse utilizando cámaras convencionales, no métricas. El hecho de requerir una menor inversión en equipo, y precisar una ejecución más rápida en campo, convierte a la fotogrametría SfM en una sólida alternativa al TLS, cuya principal ventaja es un procesado más rápido de los datos.

La finalidad del presente estudio es demostrar que la generación de modelos tridimensionales de árboles en pie, derivados de fotogrametría terrestre mediante SfM, permite obtener los datos necesarios, y con la suficiente precisión, como para elaborar ecuaciones de cubicación, sin necesidad de apeo los pies, y utilizando una metodología económica, accesible y sencilla. Para ello, se comparan los resultados obtenidos de su aplicación, con las mediciones realizadas por medio de otra metodología ya probada y validada. En concreto, se evalúan las diferencias entre los diámetros medidos a distintas alturas sobre los modelos 3D generados para cada pie objeto de estudio, y los diámetros medidos sobre esos mismos ejemplares en las mismas alturas pero utilizando un dendrómetro Criterion RD 1000 (Laser Technology Inc.). Según Rodríguez y Fernández (2009) la medición de diámetros con este dendrómetro electrónico es válida (precisa y no sesgada) siempre que se mide a una distancia similar a la altura del árbol.

2. Material y métodos

2.1. Zona de estudio

El área escogida para realizar las mediciones es el monte denominado “Pinar y Agregados” incluido en la comarca forestal XII, en el término municipal de Guadarrama (Madrid, España), que corresponde al MUP (Monte de Utilidad Pública) nº 39.

En el proceso de selección de los pies objeto de estudio se ha buscado la máxima variabilidad posible en función del grado de cobertura y los estados de desarrollo de la masa. Para ello se han aprovechado las parcelas medidas por Agresta S. Coop. dentro de los trabajos de inventario LiDAR del monte “Pinar y Agregados”, eligiéndose 4 parcelas de *Pinus pinaster* Ait. con estructura de masa diferente. Dentro de cada parcela, se han seleccionado 5 árboles que representasen la variabilidad de clases sociológicas y tamaños.

2.2. Medición de contraste. Dendrómetro láser

Para realizar las mediciones con las que se han comparado los valores obtenidos a través de los modelos 3D, se ha empleado un dendrómetro Criterion RD1000. Este dendrómetro, por medio

de un visor y un sensor de inclinación integrados, permite tomar datos de diámetro en cualquier punto del fuste (indicando también la altura a la que se encuentra dicho diámetro). Para ello, se requiere la introducción de la distancia horizontal hasta el árbol, la cual se había medido previamente utilizando el hipsómetro Vertex III.

Según Rodríguez y Fernández (2009), para que las medidas sean lo más precisas posible se debe buscar una posición a distancia similar a la altura del árbol, eligiéndose la dirección que permita una visión del mismo clara y sin obstáculos, lo cual ha condicionado posteriormente la captura de imágenes para la construcción de los modelos 3D de cada uno de los pies objeto de estudio.

Los árboles elegidos se han marcado con un número (del 1 al 5 en cada parcela) con el doble objetivo de facilitar su localización en caso de tener que volver a la parcela, e indicar la dirección en que se realizan las mediciones con el dendrómetro. Los diámetros en los modelos 3D deberán medirse con la misma orientación para ser comparables, de ahí la importancia de registrar adecuadamente la información.

Los diámetros se han medido siempre, en todos los ejemplares, a alturas de 0,30, 0,80 y 1,30 m desde la base del árbol. A partir de 1,30 m se ha continuado midiendo el fuste hacia arriba, evitando nudos e irregularidades y cubriendo el tronco hasta la primera rama viva, tomando diámetros a diferentes alturas según cada ejemplar.

2.3. Construcción de los modelos 3D

Con el fin de tener dimensiones de referencia 'independientes' para el posterior escalado de los modelos 3D, se midieron con forcípula los diámetros de cada árbol objeto de estudio a dos alturas: 0,30 y 1,30 m. Por otra parte, y antes de realizar las fotografías de dichos árboles en campo, estos diámetros se habían señalado sobre el tronco de cada pie con sendas cintas de color. Estas cintas debían aparecer claramente en las fotografías, así como en los modelos 3D que de ellas se derivaran, con el objetivo de servir para el escalado al que se ha hecho alusión.

La cámara con la que se realizó el trabajo de campo era una cámara digital Canon IXUS 85 IS, en modo automático. Teniendo en cuenta que se buscaba



Figura 1. Señalización de los pies a estudiar.

medir el fuste entre su base y la primera rama viva, las fotografías se realizaron a una distancia tal que todo ese tramo del tronco quedara incluido en las imágenes. Por otra parte, buscando reducir el tiempo de procesado posterior, se optó por no rodear completamente el árbol para fotografiarlo, ya que a efectos de medición de diámetros únicamente era necesario disponer de la vista frontal del mismo (la que se correspondía con la señalizada para realizar las mediciones con el dendrómetro Criterion RD1000). Se rodeó, por tanto, cada árbol en pie completando un arco de círculo de unos 200° centrado en la parte frontal, realizando una fotografía a cada paso. En función del tamaño de los árboles, esta parte del trabajo supuso la toma de entre 39 y 74 fotografías por ejemplar. Cuando se consideró necesario, por la gran altura del árbol o por la existencia de matorrales u otros árboles que no permitían una visión directa de la base del tronco desde todos los ángulos, se realizó otro arco de 200° desde una distancia menor a la inicial de manera que esta parte del tronco se incluyera también en las fotografías. Para evitar que no se crearan dos modelos independientes en estos casos, tenía que garantizarse que hubiera conexión entre sendas rondas de fotografías, por lo que se tomó otra fotografía a medio camino entre las dos semivueltas (véase Figura 2).

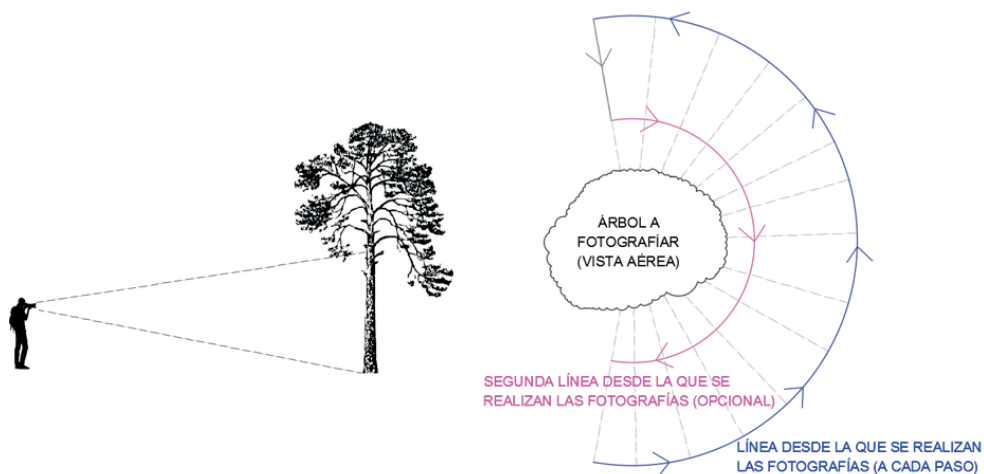


Figura 2. Esquema de la toma de fotos en perfil y en planta.

Cuando la obstrucción de visibilidad se producía de manera puntual, se optó por realizar únicamente una semivuelta, tomando varias fotografías a distintas distancias en los puntos que presentaban una visión incompleta. En los casos en los que dos de los pies elegidos se ubicaban uno próximo al otro, se optó por construir un único modelo 3D conteniendo a los dos ejemplares, reduciéndose de esta manera el número de fotografías y el tiempo de procesamiento necesarios.

Dado que uno de los objetivos de este estudio era ofrecer una metodología accesible y que no suponga grandes costes se ha optado por utilizar software libre en las distintas fases del trabajo. En particular, la aplicación elegida para el procesamiento de las fotografías ha sido VisualSFM, desarrollada por Wu (2017).

Los modelos 3D obtenidos mediante fotogrametría requerían escalado. Por otra parte, dichos modelos contenían elementos, como árboles, rocas o arbustos, cuya eliminación facilitaría las mediciones posteriores. El escalado y limpieza de los modelos se llevó a cabo utilizando el software libre Meshlab. El escalado se basó en los dos diámetros medidos previamente con forcípula a la altura de 0,30 y 1,30 m respectivamente, tal y como se ha explicado previamente.

De forma similar a como sucede con las mediciones de diámetros realizadas con forcípula, al medir sobre los modelos 3D resulta difícil escoger

siempre las mismas posiciones, aun tratándose del mismo diámetro, lo que lleva a obtener mediciones que difieren ligeramente en cada repetición. Por ello, para lograr escalar el modelo con mayor precisión, se realizaron cuatro mediciones de cada uno de los diámetros anteriormente medidos con forcípula (en total ocho: cuatro en el diámetro a 0,30 m y cuatro en el diámetro a 1,30 m). Se obtuvo, para cada una de esas ocho mediciones, el factor de escala que le correspondería para alcanzar las dimensiones reales y posteriormente se calculó la media de esos ocho factores de escala. En los modelos 3D en los que se representaban dos árboles se escaló el modelo haciendo la media entre 16 medidas (cuatro por cada diámetro).

Una vez los modelos 3D de los árboles habían sido escalados y limpiados manualmente, se procedió a medir sobre ellos una serie de diámetros, que coincidieran, en posición, con aquellos diámetros que habían sido medidos previamente en campo utilizando el dendrómetro Criterion RD1000 (véase Figuras 3, 4 y 5)

2.4. Comparación de resultados

Se ha realizado el análisis estadístico de la variable ‘diferencia entre los diámetros medidos sobre el modelo 3D y los medidos con Criterion RD1000’ con dos modalidades: (i) por un lado, teniendo en cuenta todas las medidas y, (ii) por otro, descartando los diámetros usados para escalar los modelos.

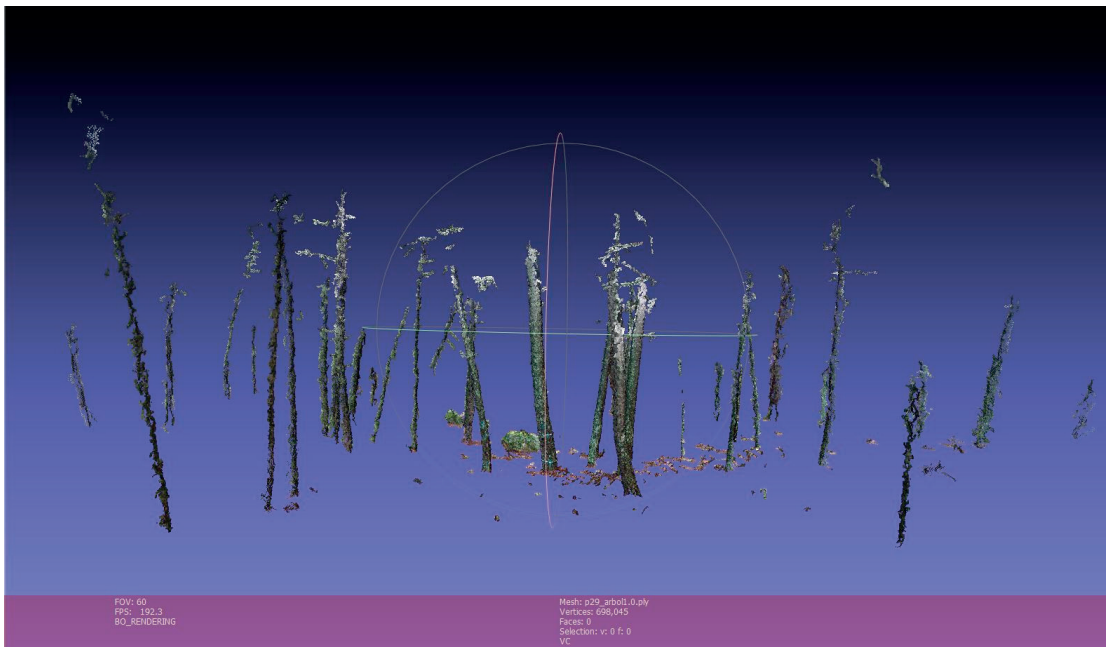


Figura 3. Modelo 3D sin limpiar.

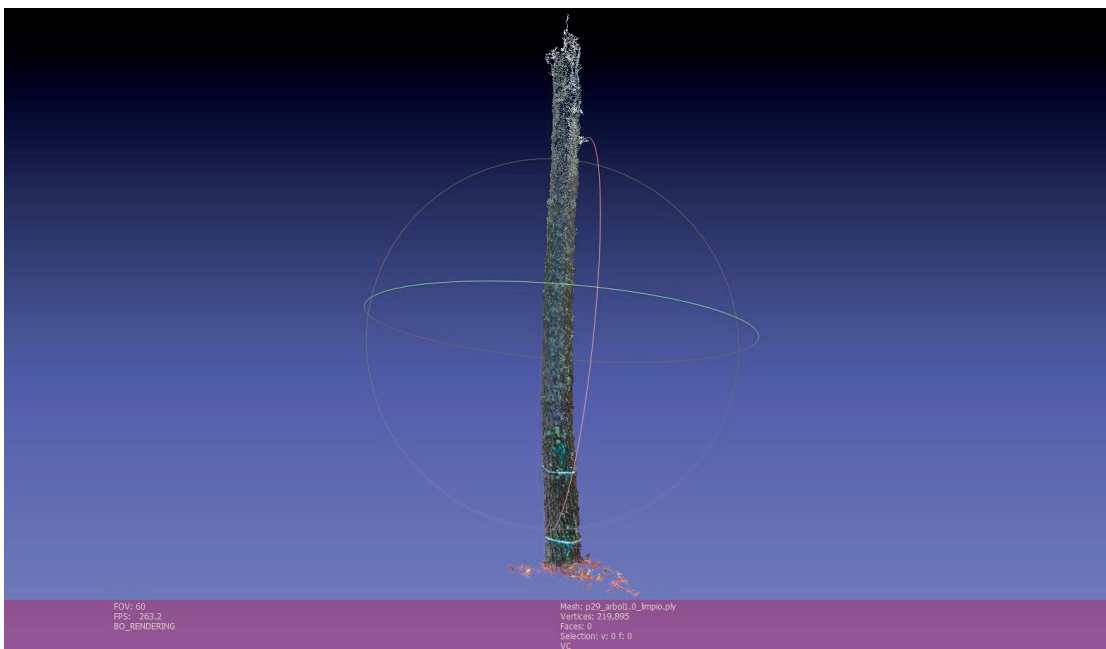


Figura 4. Modelo 3D limpio.

Además de obtener un resumen estadístico que incluye la media, la desviación típica y el rango intercuartílico de esta variable, los datos obtenidos han sido sometidos a otros dos análisis más. El primero, para comprobar la distribución normal

de la muestra: test de normalidad Shapiro-Wilk, rechazándose la hipótesis nula (normalidad) para p -valor menor o igual a 0,05. El segundo, el Test-T para muestras únicas, rechazándose la hipótesis nula (valor de la media de la muestra igual cero)

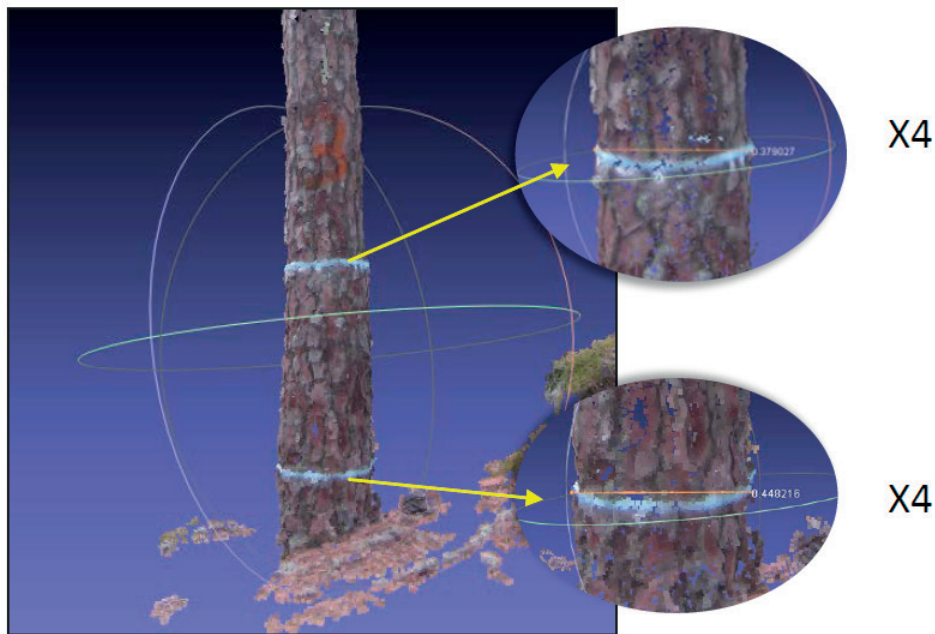


Figura 5. Mediciones para escalado del modelo.

para p -valor menor o igual a 0,05. En este caso, se obtiene el intervalo de confianza (IC) dentro del cual se encontrará la media de la muestra con un nivel de significación del 0,95. Por otro lado, se ha evaluado la posible existencia de un sesgo en función de la altura a la que se miden los diámetros por medio del coeficiente de correlación de Pearson (r).

3. Resultados

Para la construcción de modelos 3D de calidad mediante fotogrametría es de suma importancia que las fotografías se tomen con una iluminación uniforme, evitándose los contrastes de luz y los fondos claros. Si el sol está de cara en el momento de tomar la imagen, no se puede percibir nada más que una sombra del objeto. Sin embargo, dado el diseño del estudio, no ha sido siempre posible elegir las mejores orientaciones, ya que la posición para la construcción de los modelos venía determinada por la toma de medidas previamente realizadas con el dendrómetro. De hecho, en dos de las parcelas (9 y 13) no se han conseguido modelizar todos los árboles precisamente por este motivo. En total, se han modelizado 15 ejemplares, sobre los que se han efectuado 114 medidas de diámetros.

3.1. Evaluación de los diámetros obtenidos, incluyendo los diámetros de referencia para el escalado

En una primera evaluación se han tenido en cuenta los diámetros medidos a 0,30 y a 1,30 m del suelo. Aun siendo los diámetros en base a los cuales se ha escalado el modelo, forman parte del mismo modelo. Por otra parte, sobre ellos también se efectuarían cálculos a la hora de estimar otras variables dendrométricas como el volumen, motivo por el que sí se han considerado. La distribución de la diferencia de diámetros obtenida parece ajustarse a una distribución normal, tal y como se muestra en la Tabla 1 y en la figura 6.

Tabla 1. Estadísticos: diferencia diámetros modelo–diámetros Criterion (incluyendo alturas 0,30 y 1,30).

Estadístico	Valor
Media	-0,23 cm
Desviación típica	2,09 cm
Rango intercuartílico	2,82 cm
p -valor Test norm. Shapiro-Wilk	0,6908
Test T p -valor	0,2369
IC ($\alpha=0,95$)	(-0,6216 ; 0,1553)

Los resultados obtenidos (véase Tabla 1) demuestran que los errores presentan una distribución normal y que no existen diferencias significativas

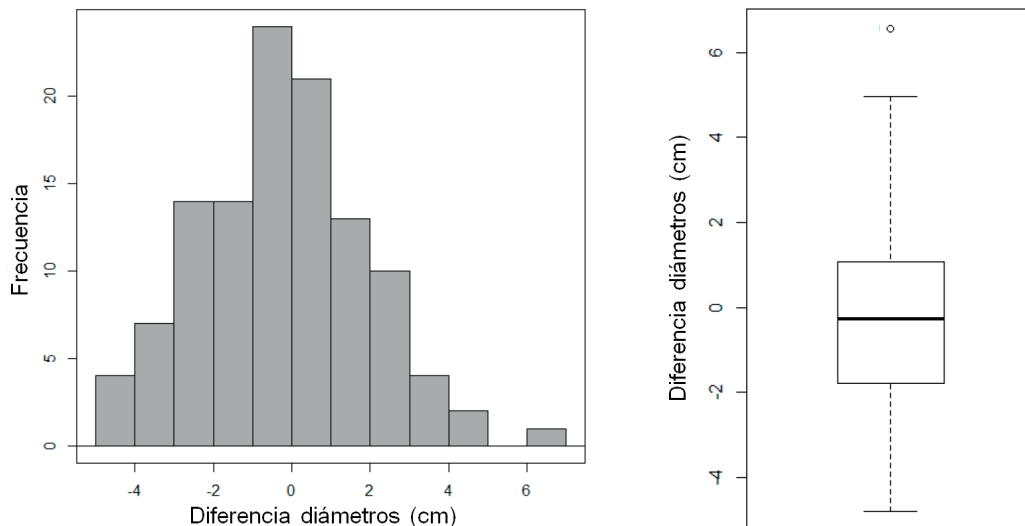


Figura 6. Distribución del error del modelo: histograma y diagrama de caja (incluyendo alturas 0,30 y 1,30).

entre las mediciones realizadas sobre los modelos 3D fotogramétricos y las realizadas en campo con el dendrómetro láser. Como se observa, la media se desvía menos de un cuarto de cm respecto al cero, y el intervalo de confianza del test-T para un nivel de significación $\alpha=0,95$ es menor al centímetro. La desviación típica es de aproximadamente 2 cm, lo puede considerarse dentro de los errores que se podrían tener en la medición de un diámetro

si lo miden dos operadores distintos, incluso con forcípula.

Además, se ha comprobado la relación entre estas diferencias de diámetro y la altura a la que se miden los diámetros sobre el árbol en pie, obteniéndose un coeficiente de correlación de Pearson $r=0,1008$, por lo que se descarta un posible sesgo (véase Figura 7).

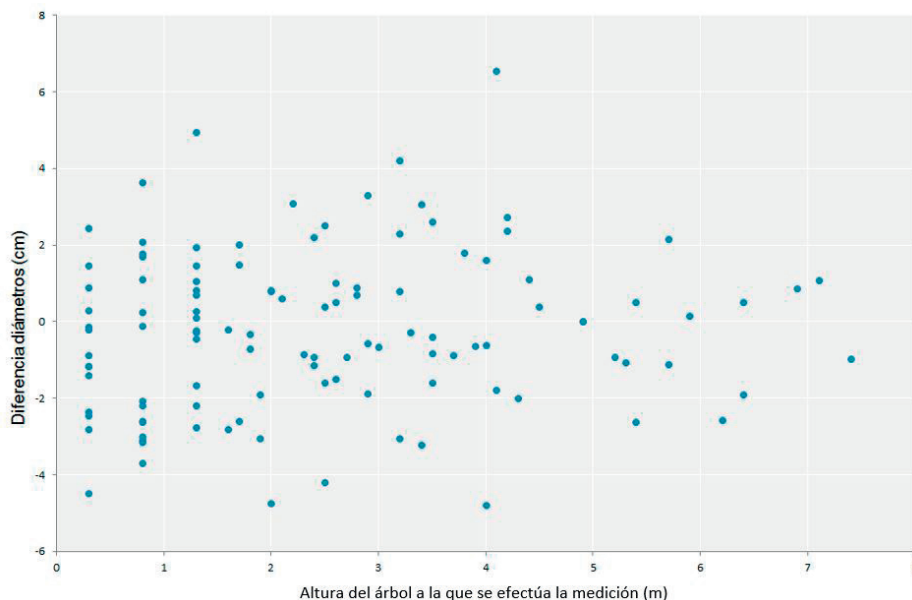


Figura 7. Relación diferencia de diámetros-altura.

3.2. Evaluación de los diámetros obtenidos, excluyendo los diámetros de referencia para el escalado

Si excluimos los diámetros utilizados para el escalado del modelo (a 0,3 y 1,3 m desde el suelo) la variable diferencia de diámetros se ajusta igualmente a una distribución normal, tal y como queda reflejado en la Tabla 2 y en la figura 8.

Tabla 2. Estadísticos: diferencia entre los diámetros medidos en modelo–Criterion (excluyendo los medidos a las alturas 0,30 y 1,30).

Estadístico	Valor
Media	-0,21 cm
Desviación típica	2,16 cm
Rango intercuartílico	2,96 cm
p-valor Test norm. Shapiro-Wilk	0,7513
Test T	p-valor 0,3587
	IC ($\alpha=0,95$) (-0,6771 ; 0,2478)

Los resultados obtenidos (véase Tabla 2) siguen siendo igualmente buenos. Los errores presentan una distribución normal y la media se desvía menos de un cuarto de cm respecto al cero. El intervalo de confianza del test-T para un nivel de significación $\alpha=0,95$ es menor al centímetro e incluye el cero indicando que no hay diferencias significativas entre las mediciones en campo con dendrómetro y las realizadas sobre el modelo 3D. La desviación típica es algo mayor a 2 cm, pero similar a la que se obtuvo incluyendo los diámetros utilizados en el escalado.

3.3. Cálculo de volúmenes

A pesar de que el número de árboles sobre los que se han medido diámetros y alturas no constituye una muestra suficientemente amplia como para obtener conclusiones estadísticamente sólidas, se ha realizado una primera aproximación y se ha evaluado el error en el cálculo de los volúmenes de las trozas medidas (las partes del tronco entre los diámetros evaluados), comparando para cada uno de los pies, el volumen obtenido a partir de los diámetros y alturas medidos sobre los modelos 3D y los medidos con el dendrómetro Criterion RD1000.

Para el cálculo de volumen se ha empleado la fórmula de Smalian:

$$V_{troza} = \frac{\pi}{4} (d_1^2 + d_2^2) \frac{L}{2}$$

Donde d_1 y d_2 se corresponden con los diámetros del árbol a cada extremo de la troza y, L con la longitud total de la misma, tal como se muestra en la figura 9.

Los datos estadísticos de la diferencia del volumen medido sobre el modelo 3D menos el volumen medido con los datos obtenidos con el dendrómetro aparecen recogidos en la Tabla 3.

Aunque la muestra no es significativa, la inmensa mayoría de los pies medidos mostraría una diferencia entre volumen medido a partir de los modelos 3D y medido con el dendrómetro

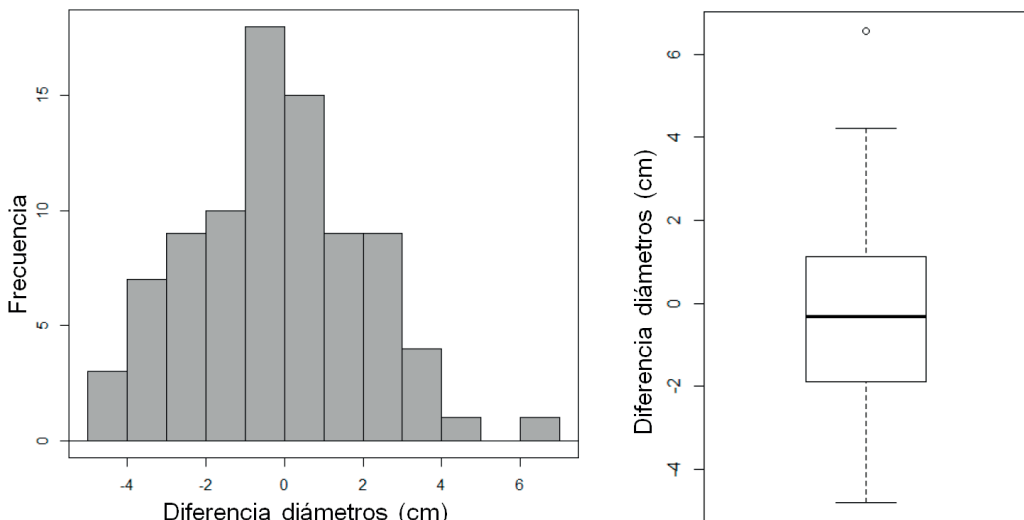


Figura 8. Distribución del error del modelo: histograma y diagrama de caja (sin incluir alturas 0,30 y 1,30).

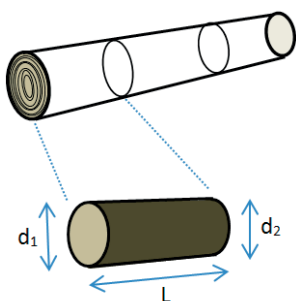


Figura 9. Parámetros de la fórmula de Smalian.

Tabla 3. Estadísticos: diferencia volumen modelo 3D–Volumen Criterion.

Estadístico	Valor
Media	5,53 dm ³
Desviación típica	61,98 dm ³
Rango intercuartílico	55,12 dm ³
<i>p</i> -valor Test norm. Shapiro-Wilk	0,3471
Test T	<i>p</i> -valor 0,7348
	IC ($\alpha=0,95$) (-28,79156 ; 39,85367)

Criterion RD1000 en campo menor de 50 dm³ en valor absoluto, lo que arrojó un valor medio algo mayor de 5 dm³, tal y como puede observarse en la Tabla 3. Por otra parte, el test de normalidad Shapiro-Wilk indica que la distribución de los datos podría considerarse normal, ya que el *p*-valor es mayor de 0,05 y por lo tanto no se puede rechazar la hipótesis nula.

Teniendo en cuenta no el error (Volumen modelo 3D–Volumen Criterion), sino el porcentaje de error [$100 \times (\text{Volumen modelo 3D} - \text{Volumen Criterion}) / (\text{Volumen Criterion})$], se han calculado los resultados que aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4. Estadísticos: diferencia volumen modelo 3D–Volumen Criterion, expresada en porcentaje.

Estadístico	Valor
Media	2,21%
Desviación típica	9,19%
Rango intercuartílico	14,34
<i>p</i> -valor Test norm. Shapiro-Wilk	0,1065
Test T	<i>p</i> -valor 0,3674
	IC ($\alpha=0,95$) (-2,880526 ; 7,302959)

Como puede observarse (véase Tabla 4) la media es cercana a cero y la desviación típica es menor que 10%. En este caso, la variabilidad es mayor.

No obstante, según el test de normalidad Shapiro-Wilk, la distribución del error en porcentaje podría considerarse normal, ya que el *p*-valor es mayor de 0,05 y no se rechaza la hipótesis nula. Igualmente no se rechaza la hipótesis nula en el Test-T, por lo que la media de la muestra puede considerarse igual a cero.

4. Discusión

El presente estudio demuestra la utilidad de la fotogrametría digital terrestre automatizada, implementada a través de algoritmos SfM, como método con el que obtener variables dendrométricas forestales de interés (diámetros a distintas alturas) con alta precisión, bajo coste y sin precisar el apeo de ejemplares. El uso de las variables derivadas de los modelos 3D elaborados permitiría, no solo la cubicación precisa de los ejemplares fotografiados, sino también el desarrollo de ecuaciones de cubicación, las cuales podrían utilizarse en una segunda fase para la estimación de volúmenes maderables a nivel de masa o rodal forestal.

Tanto si se incluyen los diámetros de referencia utilizados en el escalado (medidos a 0,30 m y a 1,30 m del suelo con forcípula) como si se excluyen, las medias de los errores (diferencias entre diámetros medidos sobre los modelos 3D y medidos con dendrómetro láser en campo) son muy próximas a cero (difieren en menos de 0,25 cm) y las desviaciones típicas se mantienen cercanas a los 2 cm, lo que puede considerarse dentro de la precisión requerida, teniendo en cuenta que habitualmente se toma como diámetro “real” el medido con forcípula y la experiencia demuestra que éste puede variar hasta 2 cm según el operador que efectúe la medición. Además, los errores tuvieron un comportamiento normal, y en ninguno de los casos se pudo rechazar la hipótesis nula de media igual a cero. Estos resultados se acercan a los alcanzados por otros autores que han utilizado metodologías similares en entornos forestales, tanto mediante fotogrametría terrestre con algoritmos SfM como mediante sistemas TLS. Casi todos los estudios se centran el diámetro medido a 1,30 m que es lo que se conoce como diámetro normal o diámetro a la altura del pecho. Mikita *et al.* (2016) alcanzaron errores medios de -0,005 cm y -1,345 cm al comparar diámetros normales de haya medidos sobre modelos 3D derivados de fotogrametría terrestre y diámetros medidos en

campo con forcípula, para lo que emplearon dos metodologías distintas de procesado de las fotografías. Por su parte, las desviaciones típicas se situaron entre 1 y 2 cm (Mikita *et al.*, 2016), lo que mejora nuestros resultados. Liang y Hyypä (2013), en un trabajo realizado con TLS en bosques de Finlandia, en el que compararon datos de campo con medidas derivadas de modelos 3D, obtuvieron errores medios cuadráticos de en torno a 0,7-2,4 cm (según metodología aplicada) para diámetros medidos a 1,30 m. Estos resultados son mejores que los de otros estudios de características similares igualmente realizados con TLS (Liang *et al.*, 2016), muchos de los cuales implican una detección automática de árboles en pie dentro de una nube de puntos y su modelización (Olofsson *et al.*, 2014), lo que dificulta la obtención de mejores resultados.

Los resultados demuestran que no existe sesgo en la variable ‘diferencia de diámetros’ en función de la altura. En principio, cabría esperar una menor diferencia entre diámetros medidos en las partes inferiores de los individuos, basada en una mejor geometría de captación de los datos, tanto en la toma de fotografías como en el uso del dendrómetro láser. Sin embargo, los resultados demuestran que la altura a la que se midieron los diámetros no afecta a la calidad de la estimación.

Por lo que respecta al cálculo del volumen, aun teniendo en cuenta que no se dispone de una muestra significativa de datos para su correcta evaluación, los resultados apuntan a que la metodología funciona bien en el caso de trozas o fustes, ya que la media del error es pequeña en valor absoluto y en porcentaje. Estos resultados se acercan, e incluso mejoran, a los de otros autores, si bien tanto la metodología como la especie forestal varían con respecto al presente estudio. Mikita *et al.* (2016) realizaron estimaciones de volumen de fuste con un error medio de entre $-0,006$ y $-0,121$ m³, y desviaciones estándar por debajo de 0,14 m³, a partir de un modelado 3D que incluía tanto TLS como ALS. Por otra parte, Astrup *et al.* (2014) estimaron volúmenes de fuste para pinos con un error medio cuadrático de 131,5 dm³, utilizando directamente modelos 3D derivados de datos TLS.

5. Conclusiones

La evaluación de las mediciones realizadas sobre los modelos 3D fotogramétricos sugiere que la metodología propuesta en este estudio es fiable ya que permite realizar mediciones de diámetros a distintas alturas, semejantes a las reales, tal y como han demostrado los resultados. Se han elaborado modelos precisos a pesar de la inicial complejidad en el uso de la tecnología SfM en una zona forestal, muy poco antropizada, donde a priori cabría esperar complicaciones derivadas de ser los árboles objetos repetitivos, ser las parcelas relativamente densas, o por el posible movimiento de ramas debido al viento, aspectos todos que dificultarían en principio la detección de puntos comunes entre imágenes, y por lo tanto la construcción de los modelos 3D. Los casos de los árboles que no han podido modelizarse parecen estar ligados al condicionante impuesto por la primera medida tomada con el dendrómetro Criterion RD1000. Al requerirse la comparación de las medidas de los mismos diámetros con las dos metodologías, las fotografías debían tomarse principalmente en la misma dirección en que se había medido con el dendrómetro, no siendo siempre ésta la orientación óptima en términos fotográficos. Sin embargo, se trata de una limitación fácilmente subsanable en futuros trabajos, y siempre que no se requiera comparar con datos tomados por otras fuentes. La tecnología SfM se presenta, por tanto, como una tecnología muy prometedora por la escasa inversión en equipo y por la rápida toma de datos en campo que precisa.

Referencias

- Astrup, R., Ducey, M.J., Granhus, A., Ritter, T., Von Lüpke, N. 2014. Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode *Canadian Journal of Forest Research*, 44(6), 666-676. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0535>
- Balvanera, P. 2012. Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*, 21(1-2), 136-147.
- Chirici, G., McRoberts, R.E., Winter, S., Bertini, R., Brändli, U.B., Alberdi-Asensio, I., Bastrup-Birk, A., Rondeux, J., Barsoum, N., Marchetti, M. 2012. National Forest Inventory Contributions to Forest Biodiversity Monitoring. *Forest Science*, 58(1), 257-268. <https://doi.org/10.5849/forsci.12-003>

- Cunliffe, A.M., Brazier, R.E., Anderson, K. 2016. Ultra-fine grain landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing of Environment*, 183, 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.019>
- De Araujo-Barbosa, C.C., Atkinson, P.M., Dearing, J.A. 2015. Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 52, 430-443. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.007>
- Diéguez-Aranda, U., Barrio, M., Castedo, F., Ruiz-González, A.D., Álvarez-Taboada, M.F., Álvarez-González, J.G., Rojo, A. 2003. *Dendrometría*. Madrid: Editorial Mundi-Prensa y Fundación Conde del Valle de Salazar.
- European Environment Agency. European Environment Agency. 20 de diciembre de 2017, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/forest-fire-danger-2/assessment>
- Fernandes, P., Luz, A., Loureiro, C., Ferreira-Godinho, P., Botelho, H. 2006. Fuel modelling and fire hazard assessment based on data from the Portuguese National Forest Inventory. *Forest Ecology and Management*, 234, supplement, S229.
- Fridman, J., Holm, S., Nilsson, M., Nilsson, P., Ringvall, A.H., Stahl, G. 2014. Adapting National Forest Inventories to changing requirements – the case of the Swedish National Forest Inventory at the turn of the 20th century. *Silva Fennica*, 48(3), article id 1095. <https://doi.org/10.14214/sf.1095>
- Hyypä, J., Hyypä, 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(5), 1339-1366. <https://doi.org/10.1080/01431160701736489>
- Liang, X., Hyypä, J. 2013. Automatic Stem Mapping by Merging Several Terrestrial Laser Scans at the Feature and Decision Levels. *Sensors*, 13, 1614-1634. <https://doi.org/10.3390/s130201614>
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- Manín Castro, G., Barrio Anta, M., Díaz-Maroto, I.J. 2001. Tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Quercus robur* L. en el norte de la provincia de Lugo. In: *Proceedings of III Congreso Forestal Español*, Granada, Spain, 25-28 September.
- MAPAMA. Mapa Forestal de España. En *Banco de Datos de la Naturaleza*. 20 de diciembre de 2017, <https://www.mapama.gob.es>.
- Mikita, T., Janta, P., Surov, P. 2016. Forest Stand Inventory Based on Combined Aerial and Terrestrial Close-Range Photogrammetry. *Forests*, 7(8), 165. <https://doi.org/10.3390/f7080165>
- Olofsson, K., Holmgren, J., Olsson, H. 2014. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. *Remote Sensing*, 6(5), 4323-4344. <https://doi.org/10.3390/rs6054323>
- Rodríguez, F., Fernández, A. 2009. Herramientas de cubicación sin necesidad de apeo de árboles. *Montes*, 98, 83-99.
- Vierling, L.A., Xu, Y., Eitel, J.U., Oldow, J.S. 2013. Shrub characterization using terrestrial laser scanning and implications for airborne LiDAR assessment. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 38(6), 709-722. <https://doi.org/10.5589/m12-057>
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenovsky, Z., Turner, D., Vopěnka, P. 2016. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, 7(3), 62. <https://doi.org/10.3390/f7030062>
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wu, C. VisualSFM. A visual Structure from Motion System. 15 de diciembre de 2017, <http://ccwu.me/vsfm>.
- Wulder, M. 1998. Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. *Progress in Physical Geography*, 22(4), 449-476. <https://doi.org/10.1177/030913339802200402>