

Muestreo operativo con escáner láser terrestre (TLS) en inventario forestal

Juan Alberto Molina-Valero¹,
Casimiro Ordóñez-Prado³,
Adela Martínez-Calvo²,
Joel Rodríguez-Ruiz²,
César Pérez-Cruzado²

¹ Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague (CZU), Czech Republic

² Proyectos y Planificación (PROEPLA), Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidade de Santiago de Compostela, España.

³ Colegio de Postgraduados, Texcoco, México

En los últimos años se ha popularizado el uso del escáner láser terrestre (TLS) en inventario forestal. El objetivo de este trabajo ha sido evaluar cómo influye el diseño de parcela en la estimación del volumen de madera a nivel de rodal basada en datos procedentes bien de muestreo convencional, bien de muestreo con TLS. El caso de estudio consistió en un rodal de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, empleando tanto métodos convencionales como escaneos de TLS. Los datos se procesaron considerando diferentes tipos y diseños de parcela. Se observó que para todos los tipos de parcela estudiados se detectaron diseños muestrales para los que las diferencias entre el volumen estimado en base a métodos convencionales y datos obtenidos con TLS fueron no significativas. Según estos resultados, la elección de diseños de parcela adecuados podría ser parte de la solución para hacer operativo el uso del TLS en inventario forestal.

Palabras clave: Lidar, monitorización forestal, sensores remotos, teledetección próxima terrestre.

1. INTRODUCCIÓN

Las metodologías empleadas en la monitorización de los ecosistemas forestales están en continua mejora, especialmente en las últimas décadas gracias a la aparición de nuevas técnicas como los sensores remotos. En este sentido, la tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*) es una de las más interesantes por su capacidad para generar información tridimensional de gran utilidad en la estimación de variables usadas en aplicaciones forestales. Por un lado, los sensores LiDAR aerotransportados ya se consideran operativos en muchas aplicaciones forestales (Dubayah and Drake, 2000). Por otro lado, los

dispositivos terrestres de tecnología LiDAR —p.ej. el escáner láser terrestre (TLS)— a pesar de albergar un gran potencial para su implementación en inventario forestal (IF), aún están en proceso de establecerse como instrumentos operativos para tal fin (Dassot *et al.*, 2011; White *et al.*, 2016). Parte de su potencial radica en que ofrecen una resolución espacial con un nivel de detalle muy alto bajo el dosel arbóreo, siendo esta una de las principales ventajas de los dispositivos terrestres frente a los aerotransportados (White *et al.*, 2016). Por lo tanto, proporcionan mejores observaciones de la vegetación cercana al suelo y consecuentemente

una mejor cobertura del tronco para estimar el componente leñoso mediante métodos no destructivos, siendo este componente uno de los más importantes en las estimaciones procedentes de datos de IF. Esto ha propiciado que múltiples trabajos se hayan centrado en la estimación del volumen del fuste con datos tomados por estos dispositivos terrestres de tecnología LiDAR (Brede *et al.*, 2019; Panagiotidis *et al.*, 2021; Stovall *et al.*, 2018). Esta variable dasométrica se ha estimado con información proveniente de estos dispositivos empleando diferentes metodologías, entre ellas la parametrización de ecuaciones de perfil (Hyypä *et al.*, 2020) y tarifas de cubicación (Prendes *et al.*, 2021), o la generación de modelos cuantitativos estructurales -QSM- (Raumonen *et al.*, 2013).

A pesar de todas las ventajas expuestas anteriormente, el TLS aún no se ha establecido como un dispositivo de referencia en IF, lo cual puede deberse a una o varias de las siguientes razones: (i) dificultades en la automatización del procesamiento de los datos para proporcionar estimaciones realistas de variables forestales importantes; (ii) altos costes de adquisición; (iii) limitaciones en el software; y (iv) falta de personal

capacitado (Liang *et al.*, 2016). Muchos investigadores coinciden en que es esencial la automatización en el procesamiento de las nubes de puntos generadas por estos dispositivos con aplicaciones informáticas asequibles y relativamente fáciles de usar, así como capaces de extraer información relacionada con atributos forestales importantes en la gestión (Dassot *et al.*, 2011; Liang *et al.*, 2016; 2018a; Newnham *et al.*, 2015; White *et al.*, 2016). En este sentido, existen decenas de algoritmos aptos para procesar estos datos (Cabo *et al.*, 2018; Liang *et al.*, 2011; 2018b; Olofsson *et al.*, 2014; Olofsson & Holmgren, 2016; Zhang *et al.*, 2019, etc.), así como varias aplicaciones, siendo muchas de ellas de libre acceso (Krok *et al.*, 2020). Sin embargo, aún hace falta desarrollar las metodologías adecuadas para hacer operativo el uso de estos dispositivos en aplicaciones operativas de IF (Liang *et al.*, 2018a). En parte esto es debido a que los estudios anteriores se han centrado principalmente en utilizar los datos adquiridos mediante TLS para replicar y/o mejorar las mediciones habituales en IF, así como para obtener variables muy costosas o no viables mediante métodos convencionales (p. ej. diámetros

del fuste a diferentes alturas), pero normalmente a nivel de parcela o superficies relativamente pequeñas. Por consiguiente, en este tipo de trabajos no se ha llegado a abordar el potencial alcance del uso del TLS como instrumento de muestreo en IF, cuyo objetivo último es estimar variables de masa a escalas más grandes (p. ej. a escala de rodal o regional) que la de árbol individual o parcela (Newnham *et al.*, 2015; White *et al.*, 2016). En consecuencia, los métodos a desarrollar para utilizar el TLS en IF con una finalidad pragmática deberían contemplar también esta clase de enfoques en los que, por ejemplo, la detección de todos los árboles de las parcelas de muestreo no tendría por qué ser un requisito (Liang *et al.*, 2018a; Newnham *et al.*, 2015). Es aquí donde se encuentra un nicho experimental mucho menos explorado en la literatura científico-técnica, ya que el error cometido en la estimación de variables de masa no solo está relacionado con el porcentaje de árboles detectados y la exactitud de las mediciones, sino también con el diseño de las parcelas de muestreo. Por ejemplo, hay estudios que demuestran mediante simulaciones que el tamaño de parcela y la estructura influyen en los



Figura 1. Imagen de uno de los puntos de muestreo

errores de las estimaciones (Corona *et al.*, 2019). Esto sugiere que la optimización del diseño de parcela para cada tipo de masa puede ser determinante a la hora de implementar el TLS como un dispositivo de muestreo. Esta optimización del diseño es relativamente fácil de hacer a posteriori del trabajo de campo. Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de valorar el uso del TLS como herramienta de muestreo es la posible ganancia en la eficiencia del muestreo que podría suponer, tanto en tiempo como en recursos humanos.

Siguiendo el hilo argumental de la introducción, el principal objetivo de este trabajo ha sido evaluar el potencial del TLS en la estimación de variables de masa a nivel de rodal, centrándose principalmente en el volumen del fuste como una de las variables más importantes estimadas en IF. No obstante, también se han explorado otras variables de masa relevantes en la gestión forestal. Para ello se han comparado las estimaciones procedentes de métodos convencionales de muestreo con las obtenidas mediante un dispositivo TLS en un rodal de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* ssp. *atlantica* H. de Vill. En particular, se han considerado diferentes tipos y diseños de parcelas de muestreo con el fin de explorar cuáles serían los más adecuados para el caso de estudio propuesto. Para todos los tipos de parcela se detectaron diseños muestrales en los que las diferencias entre el volumen estimado mediante tarifas de cubicación alimentadas por datos de campo medidos de forma convencional, y sus respectivas estimaciones con información derivada del TLS, tanto para escaneos únicos como múltiples, fueron no significativas. Estos resultados sugieren que la elección de un diseño de parcela adecuado podría ser parte de la solución para hacer operativo el uso del TLS como herramienta de muestreo en IF.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada en Galicia (NO de España), concretamente en el monte vecinal en mano común de Rodela, Touzón e Gándaras de Castro (parroquia de San Salvador de Ansemar,

Tabla 1. Variables dasométricas del rodal de estudio

Especie	N (pies ha ⁻¹)	G (m ² ha ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	$\bar{d}$ (cm) / D_o (cm)	$\bar{h}$ (m) / H_o (m)
<i>P. radiata</i>	219	22.05	221.52	35.07/41.38	23.98/25.28
<i>P. pinaster</i>	87	8.36	66.38	34.35 /*	18.93/*
Otras especies	2	0.03	0.15	12.53/*	7.30/*
Total	308	30.44	288.05	34.75/42.81	22.47/24.09

N = densidad en árboles o pies ha⁻¹, G = área basimétrica en m² ha⁻¹, V = volumen de los fustes en m³ ha⁻¹, $\bar{d}$ = diámetro medio aritmético medido a una longitud desde la base del árbol de 1.3 m (conocido como diámetro normal -d-), D_o = d medio aritmético de los árboles dominantes, $\bar{h}$ = altura media aritmética, H_o = altura media aritmética de los árboles dominantes.

Como criterio para D_o y H_o se han considerado los 100 árboles por ha de mayor d .

*Debido a no alcanzar el número mínimo de pies ha⁻¹ no se ha podido calcular el D_o y H_o .

Lugo). El rodal estudiado tiene una superficie de 3 ha, y está formado por un monte mixto compuesto principalmente por pino radiata y pino pinaster, así como otras especies acompañantes (*Quercus robur*, *Quercus pyrenaica*, *Castanea sativa* y *Betula* spp.) (Fig. 1). Las principales variables dasométricas (o de masa) se encuentran resumidas en la tabla 1.

2.2. Diseño experimental

El muestreo implementado ha seguido un diseño sistemático basado

en la implementación de una malla cuadrada regular de 20 x 20 m, ubicando 18 puntos de muestreo (o centros de las parcelas) en las intersecciones de dicha malla (Fig. 2). El rodal ha sido completamente censado mediante mediciones dendrométricas (o de árbol individual) convencionales (ver apartado 2.2.1. Muestreo convencional), lo cual ha permitido simular diferentes diseños de parcela en cada uno de los puntos de muestreo. En todos los casos el centro de la parcela se ha situado en el punto de muestreo.

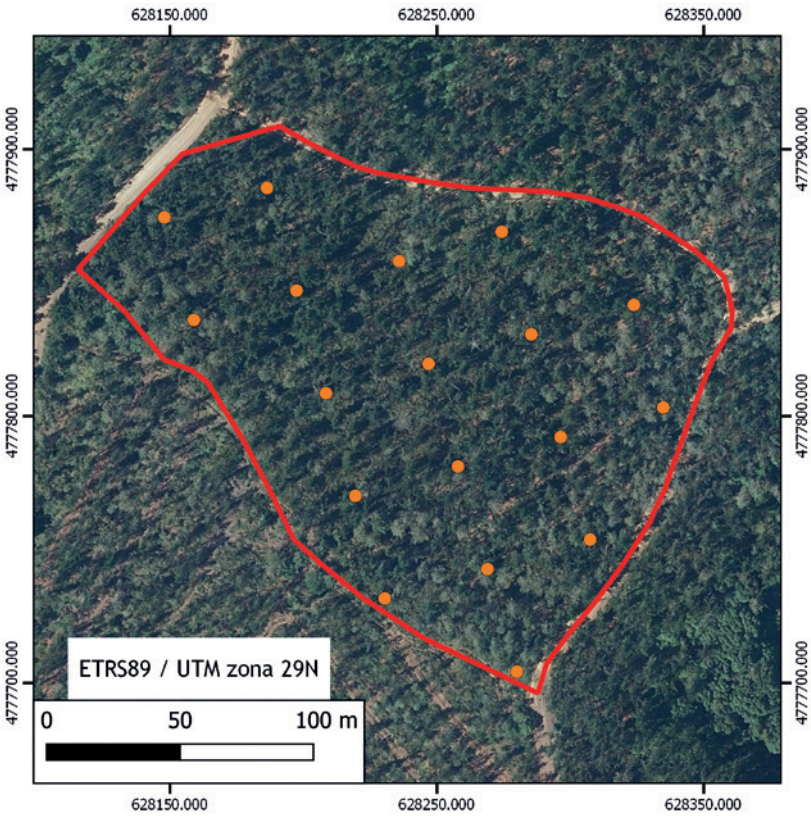


Figura 2. Diseño de muestreo de la parcela experimental. La línea roja representa el perímetro del rodal y los puntos naranjas los 18 puntos de muestreo

Los tipos de parcela considerados fueron: (i) parcelas circulares de área fija, en las cuales se miden todos los árboles que hay dentro de una circunferencia de radio r ; (ii) parcelas k-tree, en las cuales se miden los k árboles más cercanos al centro de la parcela; y (iii) parcelas relascópicas (o de conteo angular), en las cuales se miden todos los árboles aparentemente más pequeños que una apertura angular determinada, conocida como factor de área basimétrica (BAF) (Fig. 3). En el caso de las parcelas k-tree, se definió el radio r como la distancia media entre el árbol k y $k+1$ siguiendo el enfoque de Kleinn & Vilcko (2006). Para cada uno de estos tipos de parcelas se consideraron diferentes diseños (Tabla 2).

2.2.1. Muestreo convencional

De cara a obtener los valores poblacionales de la variable de interés, se realizó un censo del rodal consistente en el levantamiento topográfico de todos los árboles inventariables ($d > 3$ cm) y la medición de sus variables dendrométricas: diámetro normal —o diámetro a la altura del pecho— (d , medido a una longitud desde la base del árbol de 1.3 m) y altura total (h , altura del árbol representada por la longitud desde la base del tronco hasta el ápice). Para el levantamiento se utilizaron estaciones auxiliares medidas con un GPS de precisión subcentimétrica (Trimble R2) desde las cuales se radiaron los árboles con un dispositivo de tecnología láser (TruPulse 360°R) mediante azimuts y distancias horizontales con precisiones de 0.1° y 0.1 m respectivamente. El d de cada árbol se midió con una forcípula de 0.1 cm de precisión, y se calculó como el promedio de dos mediciones en direcciones perpendiculares. La h fue medida con un hipsómetro digital (Vertex IV, Haglöf Sweden) con una precisión de 0.1 m. Estas mediciones fueron realizadas a lo largo del año 2021. Para cada uno de los tipos y diseños de parcela implementados (tabla 2) se consideraron únicamente los árboles del censo que resultaban seleccionados según dicho diseño.

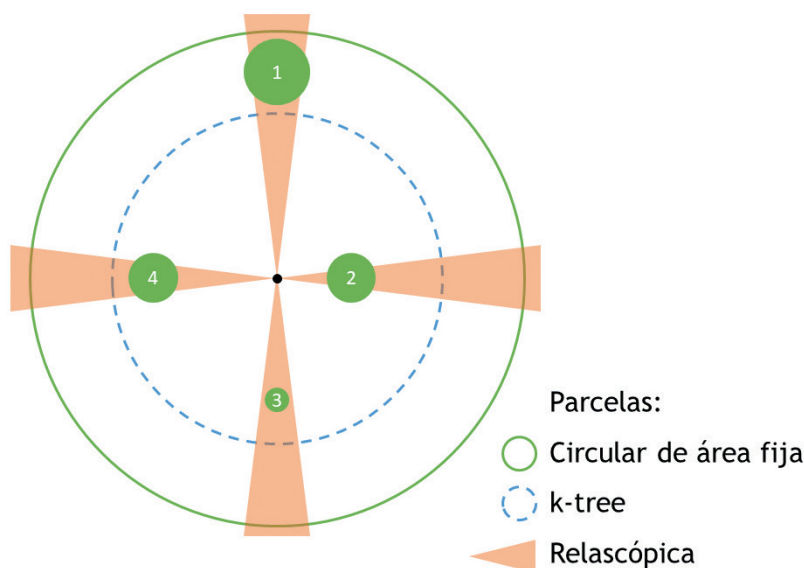


Figura 3. Esquema de las parcelas circulares de área fija, k-tree y relascópicas.

La parcela circular, representada por la circunferencia verde en línea continua, incluye los árboles 1, 2, 3 y 4. La parcela k-tree, para $k=3$, incluye los árboles 2, 3 y 4 y su radio puede observarse en línea azul discontinua. La parcela relascópica, para la apertura angular sombreada en salmón, incluye los árboles 1, 2 y 4.

Tabla 2. Diseños de parcela implementados

Tipo de parcela	Valores de r , k y BAF considerados
Parcelas circulares de área fija	$r = 10, 15, 20$ y 25 m
Parcelas k-tree	$k = 6, 8, 10$ y 12 árboles
Parcelas relascópicas	BAF = $0.5, 1, 1.5$, y 2 m ² ha ⁻¹

Tabla 3. Especificaciones técnicas del dispositivo FARO® Laser Scanner Focus^{3D} X 130

Unidad reflectora	
Campo de visión (vertical/horizontal)	$300^\circ/360^\circ$
Resolución (vertical/horizontal)	0.009° (40,960 3D-Pixel en 360°) / 0.009°
Máx. velocidad vertical de escaneo	5.820 rpm o 97 Hz
Láser (emisor óptico)	
Clase del láser	Láser de clase 1
Longitud de onda	1550 nm
Divergencia del haz	0.19 mrad (0.011°) (1/e, medio ángulo)
Divergencia del haz (al salir)	2.25 mm (1/e)

Todas las especificaciones técnicas fueron extraídas de la web de FARO

(<https://pdf.directindustry.es/pdf/faro-europe/especificaciones-tecnicas-faro-laser-scanner-focus3d-x-130/21421-32510.html>)

2.2.2. Muestreo con escáner láser terrestre (TLS)

El muestreo con TLS se llevó a cabo con un dispositivo FARO® Laser Scanner Focus^{3D} X 130, cuyas características técnicas pueden observarse en la tabla 3.

En cada punto de muestreo se realizaron 5 escaneos, uno localizado

en el centro de la parcela de muestreo convencional, esto es, en el propio punto de muestreo, y el resto desplazados 10 m en dirección norte, este, sur y oeste (Fig. 4). Además, se colocaron 4 esferas de poliespán que sirvieron a posteriori para unir los escaneos y formar una nube de puntos común.

Según este esquema, el escaneo del centro se consideró el escaneo único, y la unión de todos ellos el escaneo múltiple. Los parámetros de escaneo se correspondieron con un barrido horizontal completo (360°) y una cobertura vertical desde el ángulo cenital (0°) hasta -60°. La precisión de los escaneos fue la correspondiente a una separación de 6.34 mm entre dos puntos consecutivos —tanto horizontal como verticalmente— a 10 m de distancia del sensor. Estas mediciones fueron realizadas en el mes de agosto de 2022. Así pues, hay que tener en cuenta que tienen aproximadamente un año de desfase con los datos medidos de forma convencional. En este sentido, y solo a nivel de curiosidad, a la estimación del volumen por unidad de superficie de 2021 proveniente del censo (valor poblacional), se le sumó el crecimiento medio estimado para una masa de *P. radiata* a los 30 años y una calidad de estación media, considerado como 14 m³ ha⁻¹ en la zona de estudio (Sánchez *et al.*, 2003).

2.3. Procesado de datos

Los datos convencionales sirvieron para estimar el volumen del fuste mediante el uso de las tarifas de cubicación de árbol individual de dos entradas ($v = f(d, h)$) incluidas en Diéguez-Aranda *et al.* (2009) para las principales especies de interés forestal de la zona de estudio (Galicia). El preprocesado de los datos de TLS se hizo mediante el software FARO® SCENE. Este software permitió exportar los escaneos del centro de las parcelas (escaneos únicos) como archivos las, y unir los 5 escaneos llevados a cabo en cada punto de muestreo para exportarlos como nubes de puntos únicas (escaneos múltiples) también en formato las. El procesamiento para la obtención de nuestra variable de interés V (m³ ha⁻¹), tanto para los archivos correspondientes a escaneos únicos como para los correspondientes a escaneos múltiples, se realizó mediante el paquete de R FORTLS (Molina-Valero *et al.*, 2022) y consistió en los siguientes pasos: (i) normalización de la nube de puntos; (ii) detección de los árboles y estimación de variables

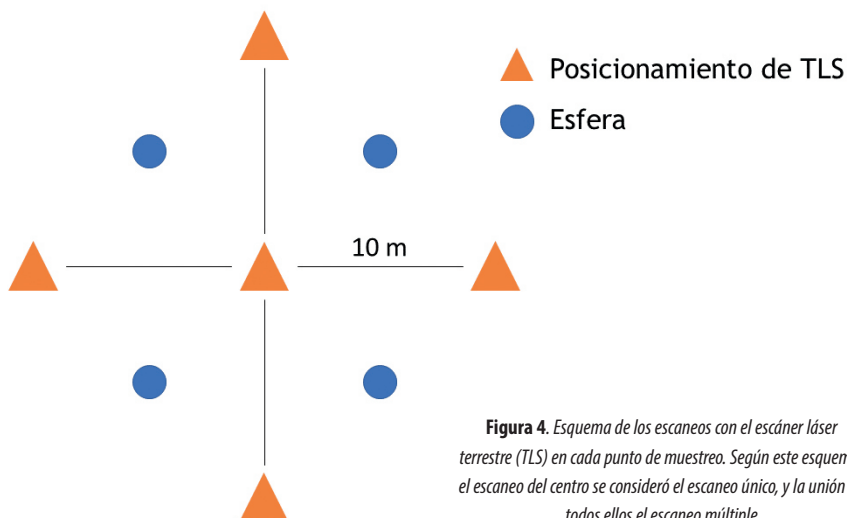


Figura 4. Esquema de los escaneos con el escáner láser terrestre (TLS) en cada punto de muestreo. Según este esquema, el escaneo del centro se consideró el escaneo único, y la unión de todos ellos el escaneo múltiple

dendrométricas; y (iii) estimación de variables dasométricas, siendo el V nuestra principal variable de interés, aunque también se evaluaron otras variables en este trabajo. A nivel interno, FORTLS estima el volumen de cada árbol detectado mediante la generación de un sólido de revolución (ecuación 1) con base en la ecuación de perfil (ecuación 2) ajustada a nivel de rodal con las secciones a diferentes alturas de todos los árboles detectados.

$$v = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot dh_i \quad (1)$$

$$d_i = d \frac{(h - h_i)^\alpha}{(h - 1.3)} \quad (2)$$

A continuación, el paquete permite obtener la estimación de la variable de interés V , basada únicamente en los datos de TLS, entre otras variables dasométricas. Por otra parte, al igual que con las estimaciones generadas de las nubes de puntos, al introducir como input el volumen de cada árbol (v) estimado en base a las tarifas de cubicación, FORTLS también expande estas estimaciones a unidades de volumen por ha para los diseños de parcela considerados, obteniéndose así la estimación de V basada en los datos convencionales.

En cuanto al procesamiento de los datos TLS con FORTLS descrito más arriba, es importante mencionar

que se llevó a cabo considerando dos opciones a la hora de detectar los árboles: (i) un procesamiento más agresivo en el que es probable que se detectan más árboles a costa de que se incremente la probabilidad de detectar falsos árboles; y (ii) un procesamiento más conservador en el que probablemente se detecten menos árboles a costa de que se reduzca la probabilidad de detectar falsos árboles. Estas dos opciones se implementaron mediante la modificación de algunos de los parámetros de las respectivas funciones del paquete. Por último, dado que las funciones de FORTLS contemplan los tres diseños de parcelas considerados (circular de área fija, k-tree y relascópica), se pudieron obtener las estimaciones para cada uno de los diseños de muestreo de manera automatizada. El flujo completo de trabajo puede verse resumido en la Fig. 5.

2.4. Evaluación de los resultados

Para comparar las estimaciones de los diferentes métodos se utilizó el test de Friedman, ya que es una prueba no paramétrica que permite comparar más de dos muestras relacionadas (i.e. no independientes) como es este caso de estudio, ya que las mediciones a comparar se realizan sobre los mismos individuos. En este caso se consideraron como tratamientos las tres metodologías de muestreo evaluadas (muestreo convencional, y escaneo único y escaneo múltiple para muestreo con TLS) para cada uno de los 12 diseños de parcela y

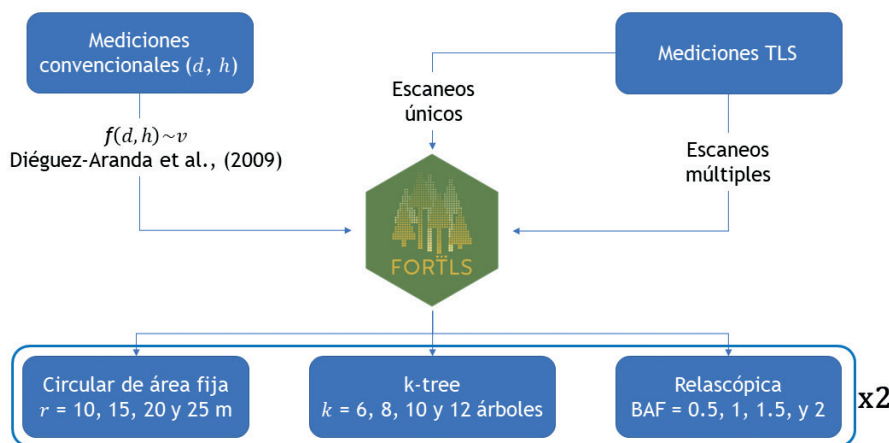


Figura 5. Esquema del flujo de trabajo y diseños de parcelas de muestreo evaluadas.

El x2 indica que todas esas estimaciones se han procesado dos veces, una vez considerando un procesamiento más agresivo en la detección de árboles, y otra considerando un procesamiento más conservador

$$\begin{cases} H_0: \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 \\ H_1: \theta_i \neq \theta_j \text{ para al menos un par } (i, j), i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

dos procesados diferentes en la detección de árboles (Fig. 5, Tabla 2). El uso de esta prueba no solo se justifica por la no independencia entre las observaciones, sino también por el reducido tamaño de muestra ($n = 18$) que hace más idóneo el uso de una prueba no paramétrica. Esta prueba además es de distribución libre, por lo que no requiere una distribución concreta (p.ej. normal) en los datos. El problema de interés consiste en chequear si existen diferencias significativas entre las distribuciones de las estimaciones del volumen para las diferentes metodologías, lo cual queda planteado mediante el contraste de la hipótesis (reflejada arriba con n°. 3), donde θ_1 , θ_2 y θ_3 , miden el efecto sobre la respuesta media debida a los métodos convencionales, de escaneo único y escaneo múltiple respectivamente. El análisis estadístico se realizó con el software libre R (R Core Team, 2022); utilizando la función `friedman.test()` incluida en el paquete base de R para el cálculo del test homónimo, y la función `frdAllPairsNemenyiTest()` de la librería `PMCMRplus` (Pohlert, 2022) para analizar las diferencias entre metodologías cuando el test de Friedman resulta significativo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lo primero que se puede observar de forma muy genérica es que las

estimaciones provenientes de procesados de las nubes de puntos menos conservadores (i.e. aquellos que detectan más árboles, pero tienen mayor probabilidad de detectar árboles falsos) se suelen estabilizar a medida que aumenta el tamaño de parcela, ya que los posibles falsos árboles detectados cada vez tienen menos peso en las estimaciones (Fig. S1). En cambio, los algoritmos más conservadores (i.e. detectan menos árboles, pero tienen menor probabilidad de detectar árboles falsos) funcionan mejor con tamaños de parcelas más pequeños porque a medida que estamos más alejados del centro de la parcela la densidad de puntos es menor y los algoritmos no son capaces de detectar árboles en zonas de menor densidad. Esto sucede tanto para escaneos únicos como múltiples.

Aplicando el test de Friedman, y con un nivel de significación de $\alpha = 0.01$, en todos los tipos de parcelas evaluadas (circular de área fija, k-tree y relascópica) se encontraron diseños muestrales en los que no existen diferencias significativas en la estimación del volumen entre las diferentes metodologías. Concretamente, los mejores resultados fueron obtenidos con los algoritmos más conservadores en la detección de árboles (figura 6). Por lo tanto, si utilizamos el diseño de

parcela adecuado, incluso el escaneo único de TLS sería una metodología acertada, con la mayor eficiencia que esto supone tanto en campo como en el procesado de las nubes de puntos. No obstante, existen otros matices entre los diferentes diseños de parcela que podrían ser tenidos en cuenta a la hora de decantarse por uno u otro. Por ejemplo, el diseño de parcela k-tree tiene la gran ventaja de ser más predecible desde el punto de la planificación económica, ya que siempre entran los mismos árboles en la parcela. Otro detalle que se observa es que las estimaciones del volumen mediante las metodologías de TLS normalmente son algo superiores (Fig. 6 y S1), lo cual tiene sentido ya que estas mediciones se realizaron aproximadamente un año después y por lo tanto la masa forestal tuvo un año de crecimiento. Al margen de la discusión quedarían los distintos tipos de tarifas y ecuaciones utilizadas para la estimación del volumen con los diferentes métodos, obviamente todas ellas con errores asociados que no han sido objeto de estudio en este trabajo. Así pues, la conclusión más importante aquí es que con metodologías basadas en escaneos de TLS, en este tipo de masa forestal y para los diseños de parcela seleccionados en la figura 6, estaríamos alcanzando estimaciones similares a las que se obtienen por métodos convencionales.

El volumen de 2021 es el estimado con las tarifas de cubicación en base al censo completo del rodal; y el volumen de 2022 es el de 2021 más los $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ que se estiman como crecimiento medio para una masa de 30 años de *P. radiata* y calidad de estación media en la zona de estudio. Las comparaciones son solo dentro de cada diseño de parcela (i.e. no se ha contrastado las estimaciones entre diferentes diseños de parcela).

En cuanto a las variables dasométricas más importantes utilizadas en la gestión forestal, se observa que para las parcelas k-tree para $k = 8$ y un procesamiento conservador en la detección de árboles (seleccionada por ser la parcela que mejor ha funcionado), según el test de Friedman no existen

diferencias significativas entre las diferentes metodologías para la mayoría de las variables (figura 7). No obstante, se debe tener en cuenta que ha pasado un año aproximadamente entre el muestreo convencional y los escaneos de TLS. Por otro lado, sí que se observan diferencias significativas en la estimación de las variables relacionadas con la altura. Tanto la altura media ($\bar{h}$) como la dominante (H_0) es subestimada por el escaneo único, mientras que no se puede decir lo mismo con el escaneo múltiple (figura 7). En cualquier caso, la subestimación de las alturas es una de las principales limitaciones del TLS (Liang *et al.*, 2018a), lo cual es lógico que sea aún más agravante en el caso del escaneo único por sufrir más oclusiones en las partes altas de las copas.

Poder estimar estas variables con exactitud mediante tecnologías como el TLS supone una gran ventaja para la gestión forestal, ya que se trata de las principales variables incluidas en los modelos de rodal utilizados en la zona (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). Por lo tanto, si la estimación directa del volumen no tuviera la exactitud requerida, esta sería una posible vía alternativa en la estimación del volumen. Además, estas variables sirven para proyectar el crecimiento de la masa forestal en base a los modelos de rodal previamente mencionados, con las ventajas que ello supone en la optimización de la gestión forestal.

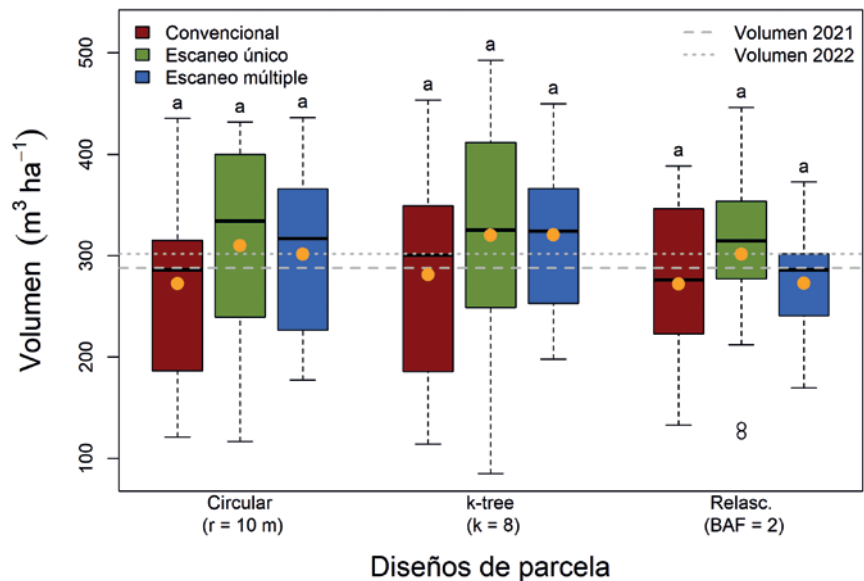


Figura 6. Diseños de parcela seleccionados porque no muestran diferencias significativas entre las tres metodologías de muestreo evaluadas y considerando algoritmos conservadores en el procesamiento de las nubes de puntos.

Los p-valores del test de Friedman son 0.024, 0.179 y 0.056 siguiendo los diseños de parcela de izquierda a derecha de la imagen.

Los puntos naranjas representan las medias aritméticas

El uso de estos dispositivos está cada vez cerca de ser una realidad operativa en IF, al menos desde el punto de vista de una gestión maderera convencional en muchas de las masas forestales europeas. Así lo demuestran las decenas de algoritmos (Liang *et al.*, 2018a) y aplicaciones (Krok *et al.*, 2020) existentes. Por lo tanto, el paquete de R FORTLS que ha sido utilizado en este trabajo es una herramienta más, con la ventaja de ser un software libre y el inconveniente de necesitar conocimiento del entorno y lenguaje de programación R. Sin

embargo, el enfoque que tiene esta herramienta con respecto al muestreo forestal ha sido idóneo para explorar el principal objetivo de este trabajo, que ha sido evaluar el TLS como un dispositivo de muestreo en lugar de como un dispositivo de medición. A la luz de este trabajo se puede decir que, tanto para métodos convencionales como asistidos por TLS, no hay una receta única para diseñar un IF, siendo por tanto fundamental el contar en este proceso con personal técnico cualificado y experimentado.

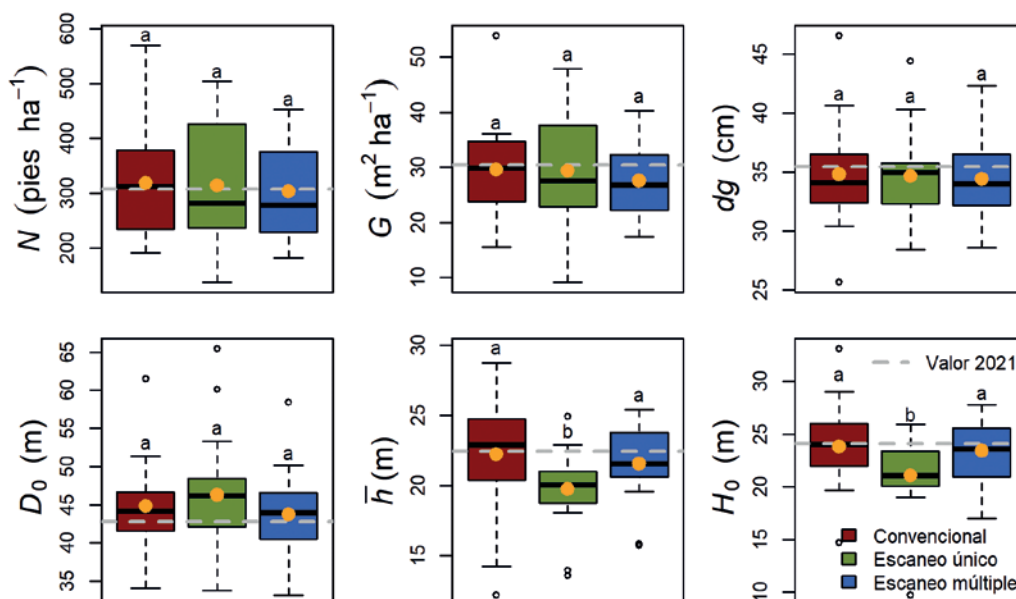


Figura 7.

Comparación entre las diferentes metodologías en la estimación de las variables dasométricas para la parcela k-tree (para $k = 8$) y un procesamiento conservador en la detección de árboles.

N = densidad en árboles o pies ha^{-1} ,
 G = área basimétrica en $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$,
 V = volumen de los fustes en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$,
 d_g = diámetro medio cuadrático medido a una longitud desde la base del árbol de 1.3 m (conocido como diámetro normal -d-),
 D_0 = d medio aritmético de los árboles dominantes,
 $\bar{h}$ = altura media aritmética,
 H_0 = altura media aritmética de los árboles dominantes.

Los puntos naranjas representan las medias aritméticas. Como criterio para el cálculo de D_0 y H_0 se han considerado los 100 árboles por ha de mayor d. El valor de 2021 es el estimado en base al censo completo del rodal.

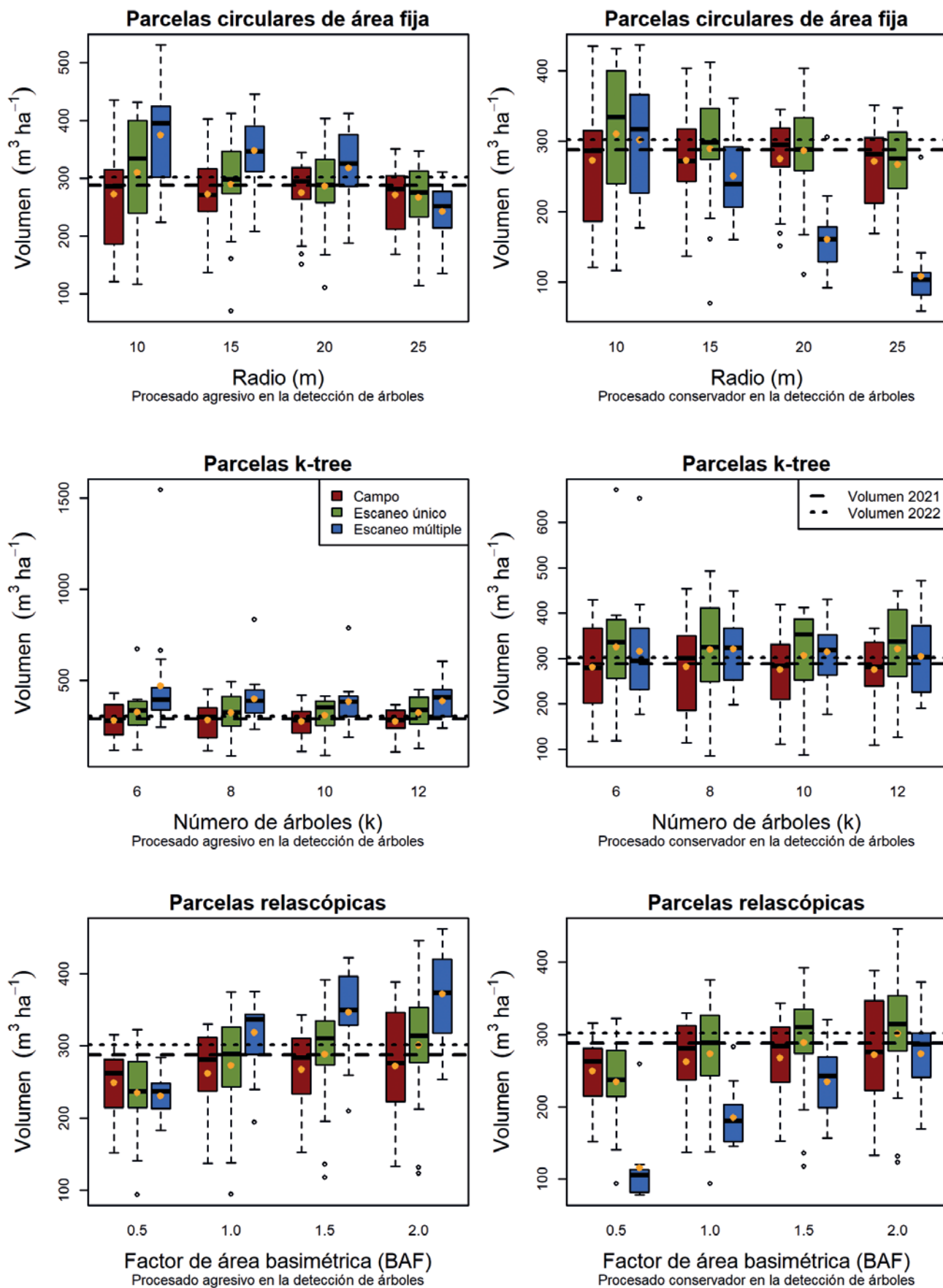


Figura S1. Comparación entre los diferentes diseños de parcela y metodologías en la estimación del volumen. A la izquierda se muestran los resultados cuando las nubes de puntos han sido procesadas de manera más agresiva en la detección de árboles, y a la derecha cuando estas han sido procesadas de manera más conservadora.

4. CONCLUSIONES

Para todos los tipos de parcela evaluadas se detectaron diseños muestrales para los que las diferencias entre el volumen promedio estimado en base a datos medidos en campo de manera convencional y sus respectivas estimaciones con información derivada del TLS, tanto para escaneos únicos como múltiples, no fueron significativas. No obstante, el diseño de parcela que mejor funcionó fue el de k-tree cuando las nubes de puntos son procesadas de forma más conservadora en la detección de árboles. De cualquier modo, estos resultados se basan en

un caso de estudio concreto y por lo tanto no deben ser extrapolados a otro tipo de circunstancias. Por consiguiente, los hallazgos de este trabajo sugieren que parte de la solución para hacer operativo el uso del TLS en IF podría estar basada en la elección de un diseño de parcela adecuado.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen enormemente la ayuda prestada por Diego Lombardero Barrera, Eduardo Seijo de Bernardo, Mario López Fernández y Óscar López Álvarez en los trabajos de campo.

Financiación

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto “Diseño de sistemas de monitorización forestal a escala regional” (ED431F 2020/02) financiado por la Consellería de Educación, Universidade e F.P (Xunta de Galicia). AMC y JRR han sido financiados por la Consellería del Medio Rural en el marco del proyecto “Desarrollo del inventario forestal continuo de Galicia” [2020-CP031]. Además, JRR ha sido financiado por un contrato predoctoral del campus de especialización Campus Terra, y CPC por el Ministerio de Ciencia e Innovación [RYC2018-024939-I].

Referencias

- Brede, B., Calders, K., Lau, A., Raunonen, P., Bartholomeus, H. M., Herold, M., & Kooistra, L. 2019. Non-destructive tree volume estimation through quantitative structure modelling: Comparing UAV laser scanning with terrestrial LIDAR. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111355.
- Cabo, C., Ordóñez, C., López-Sánchez, C. A., & Armesto, J. 2018. Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 69, 164-174.
- Corona, P., Di Biase, R. M., Fattorini, L., & D'Amati, M. 2019. A Monte Carlo appraisal of tree abundance and stand basal area estimation in forest inventories based on terrestrial laser scanning. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(1), 41-52.
- Dassot, M., Constant, T., & Fournier, M. 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*, 68(5), 959-974.
- Diéguez-Aranda, U., Alboreca, A. R., Castedo-Dorado, F., González, J. Á., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F. & Gómez-García, E. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. *Forestry*, 82, 1-16.
- Dubayah, R. O., & Drake, J. B. 2000. Lidar remote sensing for forestry. *Journal of Forestry*, 98(6), 44-46.
- Hyypä, E., Kukko, A., Kaijaluoto, R., White, J. C., Wulder, M. A., Pyörälä, J., & Hyypä, J. 2020. Accurate derivation of stem curve and volume using backpack mobile laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 161, 246-262.
- Kleinn, C., & Vilčko, F. 2006. A new empirical approach for estimation in k-tree sampling. *Forest Ecology and Management*, 237(1-3), 522-533.
- Krok, G., Kraszewski, B., and Stereńczak, K. 2020. Application of terrestrial laser scanning in forest inventory—an overview of selected issues. *Forest Research Papers*, 81(4), 175-194.
- Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M., & Holopainen, M. 2011. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(2), 661-670.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., & Vastaranta, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63-77.
- Liang, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., Pyörälä, J., Pfeifer, N., & Wang, Y. (2018a). International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 144, 137-179.
- Liang, X., Kukko, A., Hyypä, J., Lehtomäki, M., Pyörälä, J., Yu, X., & Wang, Y. (2018b). In-situ measurements from mobile platforms: An emerging approach to address the old challenges associated with forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 143, 97-107.
- Molina-Valero, J. A., Martínez-Calvo, A., Ginzo Villamayor, M. J., Novo Pérez, M. A., Álvarez-González, J. G., Montes, F., & Pérez-Cruzado, C. 2022. Operationalizing the use of TLS in forest inventories: The R package FORTLS. *Environmental Modelling & Software*, 150, 105337.
- Newnham, G. J., Armston, J. D., Calders, K., Disney, M. I., Lovell, J. L., Schaaf, C. B., & Danson, F. M. 2015. Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. *Current Forestry Reports*, 1(4), 239-251.
- 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.
- Olofsson, K., & Holmgren, J. 2016. Single tree stem profile detection using terrestrial laser scanner data, flatness saliency features and curvature properties. *Forests*, 7(9), 207.
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., & Slavík, M. 2021. Assessment of stem volume on plots using terrestrial laser scanner: A precision forestry application. *Sensors*, 21(1), 301.
- Pohlert T. 2022. PMCMRplus: Calculate Pairwise Multiple Comparisons of Mean Rank Sums Extended. R package version 1.9.6, <<https://CRAN.R-project.org/package=PMCMRplus>>.
- Prendes, C., Cabo, C., Ordóñez, C., Majada, J., & Canga, E. 2021. An algorithm for the automatic parametrization of wood volume equations from Terrestrial Laser Scanning point clouds: application in *Pinus pinaster*. *GIScience & Remote Sensing*, 58(7), 1130-1150.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Raunonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., & Lewis, P. (2013). Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sensing*, 5(2), 491-520.
- Sánchez, F., Rodríguez, R., Rojo, A., Álvarez, J. G., López, C., Gorgoso, J., & Castedo, F. 2003. Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(2), 65-83.
- Stovall, A. E., Anderson-Teixeira, K. J., & Shugart, H. H. 2018. Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry. *Forest Ecology and Management*, 427, 217-229.
- White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T., & Tompalski, P. 2016. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(5), 619-641.
- Zhang, W., Wan, P., Wang, T., Cai, S., Chen, Y., Jin, X., & Yan, G. 2019. A novel approach for the detection of standing tree stems from plot-level terrestrial laser scanning data. *Remote Sensing*, 11(2), 211.