



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Nuevo paradigma en la inventariación forestal: uso de inteligencia artificial para la cuantificación de recursos forestales en base a nubes de puntos lidar

LÓPEZ SERRANO, F. R.¹, RUBIO CABALLERO, E.M.¹, ANDRÉS ABELLÁN, M.¹, GARCÍA MOROTE, F.A.¹, PICAZO CÓRDOBA, M.I.¹, GARCÍA SAUCEDO, F.¹, SÁNCHEZ GARCÍA, J.M.², SERENA INNERARITY, J.², CARRASCO LUCAS, L.³, GARCÍA GONZÁLEZ, O.³, GARCÍA GONZÁLEZ, J.C.³

¹ Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes (ETSIAM), Instituto de Investigación en Energías Renovables (IER)

² Naturaleza y Tecnología de la Mancha (NATURTEC) SL

³ Dielmo 3D SL

Resumen

El inventario es la parte fundamental de la gestión forestal sostenible puesto que, para tomar decisiones acertadas, hay que conocer el estado actual de la vegetación de la forma más precisa posible. El avance tecnológico de la sociedad nos proporciona nuevas herramientas que, adaptadas al objetivo deseado, en este caso los montes, nos permiten plantear un nuevo paradigma en la inventariación forestal. Es el caso de la tecnología LIDAR láser terrestre móvil de retorno discreto múltiple (LTM). El grupo operativo GO MONTE DIGITAL, integrado por la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Dielmo 3D SL y Naturtec SL, han utilizado esta tecnología y han desarrollado un nuevo software específico denominado AID-Forest (Artificial Intelligence for Digital Forest), que permite identificar de forma totalmente automática, con precisión y a bajo coste, todos los árboles que componen la parcela o cantón y obtener la mayoría de los parámetros dendro y dasométricos objetivo de la caracterización del monte. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento muy adecuado en diferentes ecosistemas pero, es más, nuestro software tiene la capacidad de ser adaptable a otras casuísticas no contempladas hasta ahora.

Palabras clave

Inventario forestal, inteligencia artificial, detección de objetos, lidar, AID-Forest.

1. Introducción

En la actualidad, excepto los montes típicamente productores de productos maderables de calidad (masas forestales de *Pinus silvestris*, *P. nigra*, *Fagus sylvatica*, *Quercus robur*, *Q. rubra* entre otras), que se gestionan de forma minuciosa y están adecuadamente tratados, el resto no lo están. Apenas existen proyectos de gestión aplicados o instrumentos de gestión forestal sostenible, y si existen, en muchas ocasiones no se aplican.

El inventario forestal constituye en muchas ocasiones el punto de partida para la planificación sostenible del monte. Proporciona la información detallada del conjunto de factores bióticos y abióticos donde el monte se desarrolla para la planificación, monitorización, evaluación del estado y los bienes y servicios del mismo. Si bien no existe un conjunto de indicadores generalmente aceptado que permita hacer comparaciones entre una situación dada y una deseable, la inventariación debe cuantificar los parámetros dasométricos de interés a nivel rodal o cantón dentro del cuartel y monte. En este sentido resulta crítico que esta información sea lo más veraz o cercana a la realidad del monte posible.

Uno de los aspectos que más trabajo y coste consume en la gestión del monte es la inventariación de la masa arbórea. De forma clásica se hace mediante muestreos con unas pocas parcelas de un determinado tamaño (inventario por parcelas de muestreo). En estas parcelas, las

variables dendrométricas de cada árbol son medidas con instrumentación forestal que es manejada por operarios. En ocasiones, esta técnica da lugar a estimaciones de los parámetros dasométricos de interés que no se ajustan a la realidad del monte dificultando o impidiendo la aplicación del proyecto de gestión planificado. Este contexto justifica la necesidad de aportar soluciones económicamente viables que permitan a los propietarios del monte disponer de un inventario adecuado de sus montes.

En este escenario, en la última década, se viene asistiendo a una pequeña “revolución” en las herramientas disponibles para la medición de los recursos forestales, debido al mayor desarrollo tecnológico. Tal es el caso de la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging, o Laser Imaging Detection and Ranging). La tecnología LiDAR produce nubes de puntos en 3D, correspondientes a la ubicación de un elemento impactado de la superficie del dosel vegetal. En esta nube de puntos cada punto puede ser clasificado (p. ej., suelo, vegetación baja, árboles) e identificar y medir las variables dendrométricas de cada individuo de forma automatizada para posteriormente obtener las variables de la masa forestal. En este sentido, el Lidar Terrestre Móvil (LTM) presenta una gran ventaja frente al LiDAR aéreo y el LiDAR Terrestre Fijo, por precisión y operatividad, respectivamente.

Las ventajas de este tipo de tecnología para el sector forestal son evidentes, al tratarse de una tecnología económicamente viable y competitiva que puede redundar en el uso eficiente de los recursos forestales, la mejora de los procesos encaminados a la protección del monte y su adaptación frente al cambio climático, todo ello gracias a la posibilidad de poder llevar a cabo una gestión optimizada de los recursos forestales maderables.

Sin embargo, la tecnología Lidar sólo genera nubes de puntos que representan al objeto que se quiere cuantificar. La problemática, para el caso de la inventariación forestal, es obtener de esa nube de puntos la información dendro y dasométrica que el forestal requiere para la toma de decisiones en la gestión. Por lo tanto, el principal obstáculo es cómo extraer automáticamente los parámetros de la masa forestal de la nube de puntos, porque la extracción manual no es una opción debido a la gran cantidad de trabajo y tiempo (Safaie et al 2021). De todos modos, se han llevado a cabo algunos trabajos sobre métodos manuales, pero enfocados a investigaciones particulares sobre extensión reducida de masas forestales, y estructuras forestales simplificada (Bogdanovich et al, 2021). Algunos métodos automatizados están basados en puntos, es decir, el algoritmo toma puntos para extraer los parámetros del árbol directamente o ii) métodos basados en cuadrículas, donde las nubes de puntos se convierten en cuadrículas -raster- (Safaie et al. 2021).

Aquí nosotros presentamos AID-FOREST, el primer software totalmente automatizado que permite obtener la información dasométrica necesaria de una masa forestal, después de haberla digitalizado mediante una nube de puntos. Por tanto, podríamos indicar que se abre un nuevo paradigma en la inventariación forestal, que supone una mejora significativa de las estimaciones de existencias en el cantón, bajando el coste del inventario. Por otro lado, esta tecnología proporciona información digitalizada de las unidades inventariables, información que se puede utilizar como referencia y de comparación para el siguiente inventario (lo normal cada 10 años, si el periodo de regeneración de masas regulares es fijado en 20 años) y un seguimiento a la carta de todas las actuaciones en el pasado. Es decir, permitiría realizar una trazabilidad de todas las actuaciones en la masa forestal con un detalle no alcanzado hasta ahora.

2. Objetivos

Este trabajo pretende alcanzar el objetivo general de mostrar la fiabilidad y exactitud del software AID-FOREST para la obtención de parámetros dendro y dasométricos en base a nubes de puntos tomadas mediante Lidar Terrestre Móvil (LTM).

Como objetivos particulares se plantean dos: A. demostrar la capacidad de AID-FOREST para la detección, localización y medición de árboles (nº de pies y diámetros) en una masa forestal (bien

parcelas, bien a nivel rodal o cantón). B. Evaluar la exactitud de AID-FOREST para la obtención de los volúmenes totales de los troncos de los árboles ubicados en la zona a inventariar.

3. Metodología

Diseño experimental

Para alcanzar los dos objetivos particulares planteados, se van a desarrollar dos experimentos independientes, cada uno de los cuales abordará un objetivo diferente.

A. Para evaluar la exactitud de la detección de pies y la medición de los diámetros de los árboles, se ha desarrollado un diseño experimental con un factor, densidad de la masa, donde se han elegido un total de 16 parcelas de aproximadamente 25x25 m, en un monte de la provincia de Valencia (Ayora), denominado “La Hunde y la Palomera”, MUP V154, poblado con la especie *Pinus halepensis* Mill, con una edad aproximada de 70 años. De forma sistemática (cada 100 x 100 m) se han replanteado 16 parcelas cuadradas, delimitadas con 4 jalones en las esquinas, los cuales llevaban acoplada una esfera de plástico de 15 cm de diámetro, a efectos de ser tomadas como referencia y poder recortar las nubes de puntos generadas con el equipo de Lidar Terrestre Móvil (LTM), a la dimensión de la parcela. En todas ellas, se han medido todos los diámetros normales (utilizando una forcípula digital de precisión 1 mm) de los pies incluidos dentro de los límites de las mismas, así como las alturas de una muestra de 4 pies por parcela (utilizando un hipsómetro láser True-Pulse). Posteriormente, cada parcela ha sido recorrida por sus lados y por una diagonal mediante el equipo lidar ZEB-HORIZON (GeoSLAM). Este equipo consiste en la utilización de un LIDAR de retorno discreto múltiple que emite 300000 puntos/s y tiene un alcance máximo 100 m.

B. Para comprobar la validez del software AID-FOREST en la cuantificación del volumen del tronco completo de un árbol, se han elegido en un monte de Urbasa (Navarra), un total de 9 pies de *Fagus sylvatica* L., de edad aproximada de unos 60 años. Todos los pies elegidos eran bien conformados y con prácticamente un fuste único (no bifurcado). Estos pies han sido apeados y cubitados perfectamente mediante trozas de longitud 1 m, aplicando la fórmula de Smalian para su cubicación. Así, el diámetro normal, la altura total y el volumen total con corteza han sido obtenidos para cada árbol. Previo al apeado, cada pie ha sido digitalizado con el mismo equipo lidar mencionado (ZEB-HORIZON).

Procesado de los datos generados por el equipo Zeb-Horizon

Los archivos generados por el equipo ZEB-HORIZON, bien a nivel parcela o cantón, bien cuando sólo nos interesan algunos árboles, deben ser pre-procesados por el software asociado al equipo fabricante. Concretamente, es el software Geoslam HUB (Geoslam) que realiza la conversión del archivo bruto en un archivo con formato legible por otros softwares (ejemplo, *.las, *.laz, etc) y también permite visualizar y hacer paseos virtuales a través de la nube de puntos (Figura 1). Una vez realizada esta conversión, es preciso recortar la nube de puntos (zona a inventariar, parcelas o rodales/cantones) por sus límites, dado que AID-FOREST determina la superficie a inventariar por las dimensiones del archivo de la nube de puntos. Para ello, el fabricante también dispone de otro software asociado al HUB, es el Geoslam DRAW, que permite no solo recortar la nube de puntos sino también realizar vistas, georreferenciaciones, alineaciones, mediciones manuales, etc (Figura 2). En cualquier caso, cada parcela, rodal o cantón, debe estar conformado por un archivo en formato *.las., el cual será el input en el software AID-FOREST.



Figura 1. Imagen de una nube de puntos visualizada a través de la interfaz del software Geoslam HUB

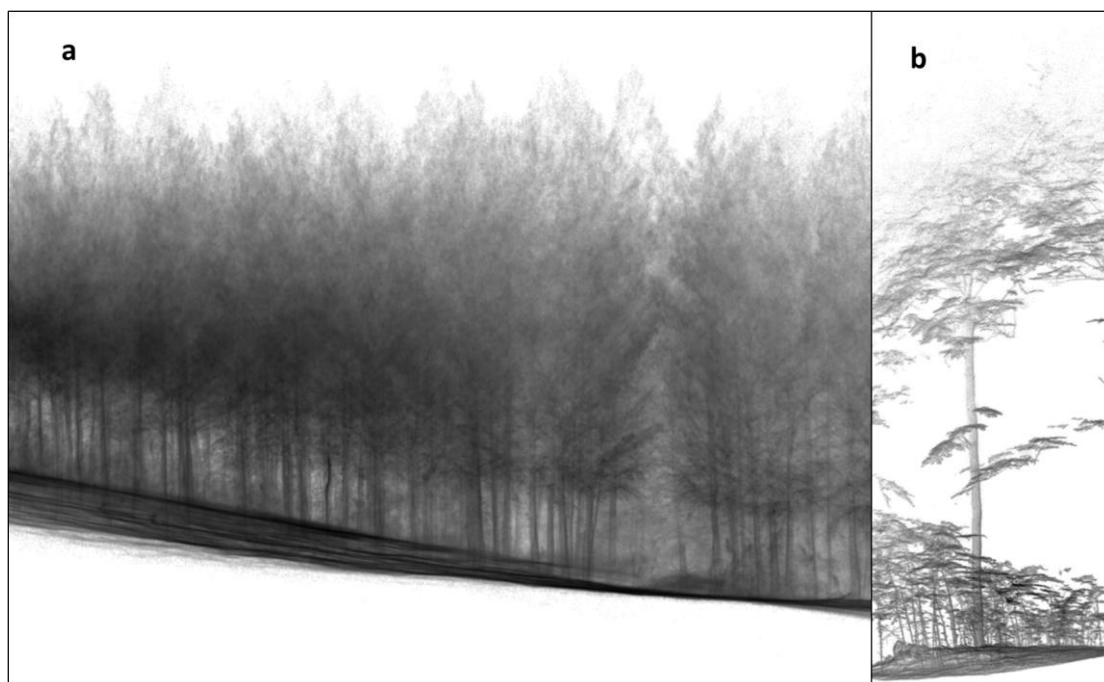


Figura 2. Nube de puntos rasterizada mediante el software Geoslam DRAW representando a una masa forestal (a) y nube de puntos correspondiente a un árbol individual recortado con Geoslam DRAW (b).

Descripción del software AID-FOREST, ©Grupo Operativo “Monte Digital”, ref. 2018 0020012125)

AID-Forest (Artificial Intelligence for Digital Forest) es, hasta donde nosotros conocemos, el único software totalmente automático que permite identificar árboles, posicionarlos y realizar las principales mediciones de interés para el inventario forestal. Es un software que permite manejar grandes volúmenes de datos, por lo que el único límite al procesado lo impone las limitaciones de los equipos LIDAR en la toma de datos de nubes de puntos. Internamente, AID-Forest genera una serie de productos automáticos como la clasificación de suelo, MDT, MDS y normalización de la nube de puntos a cota 0. Posteriormente, la nube estandarizada será utilizada para obtener imágenes ráster a distintas alturas (definidas por el usuario) y, finalmente, en base a esas imágenes, y mediante un modelo entrenado basado en inteligencia artificial de reconocimiento de objetos (TensorFlow, Huang et al. 2017), se detectan aquellas formas que se parecen a secciones circulares de los troncos. La combinación de todas las diferentes detecciones a diferentes alturas nos da información 3D de la posición de los árboles y nos permite crear capas vectoriales de salida con la posición de estos, así como medir sus propiedades geométricas (diámetros, alturas, etc.). La versión actual (v.27) del software está diseñada para realizar perfectamente la medición de árboles de fuste único. Sin embargo, la existencia de pies bifurcados no altera significativamente la estimación del volumen total, dado que las secciones de fustes únicos o fustes bifurcados suelen mantener las secciones acumuladas en magnitudes similares.

Análisis estadísticos

Para comparar si los valores medios de variables como el número de pies por parcela o el diámetro medio (o diámetro de un pie) obtenidos mediante ambas metodologías son estadísticamente similares, se ha utilizado el método de regresión lineal simple por mínimos cuadrados (Neter et al. 1996) entre variables medidas con técnicas clásicas y las obtenidas mediante LTM-AIDFOREST. Si la constante del modelo no es significativamente distinta de 0 y la pendiente no difiere significativamente de 1, entonces podemos afirmar que las variables obtenidas mediante LTM-AIDFOREST estiman con precisión las variables obtenidas por técnicas clásicas. La comprobación de que la constante es estadísticamente igual a 0 se realiza mediante el test de la t-student. Para comprobar que la pendiente no difiere de 1 se analiza a través del intervalo de confianza de la pendiente, esto es, $\text{media} \pm t \times \text{error estándar}$, intervalo que debe incluir al 1.

Para comparar si las distribuciones diamétricas obtenidas mediante ambas técnicas son estadísticamente similares, y dado que en el inventario de parcelas no se ha realizado con árboles numerados, utilizaremos la comparación de medias, medianas y varianzas de muestras independientes para cada metodología de inventariación, mediante el test de la t-student, test de la F-Snedecor y test Mann-Whitney (Wilcoxon) W-test, respectivamente. De igual manera, utilizaremos el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S test) para comparar si las distribuciones diamétricas acumuladas de ambas metodologías de inventario difieren estadísticamente entre sí (Neter et al., 1996).

Para el caso de la cubicación de árboles individuales, donde sí que están identificados cada uno de ellos en ambas metodologías, utilizaremos para su comparación la técnica de muestras emparejadas (Neter et al. 1996), donde lo que se evalúa es si la diferencia pie a pie de los parámetros medidos (diámetro normal, altura total y volumen total) con ambas técnicas difieren o no estadísticamente de cero.

4. Resultados

La comparación de los parámetros dasométricos a nivel parcela tanto de número de pies como del diámetro medio obtenidos con técnicas clásicas (n y D_n , respectivamente), y los obtenidos con la técnica LTM-AIDFOREST (n_z y D_{nz} , respectivamente), son mostrados en la Tabla 1 y Figuras 3 y 4. Tal como se aprecia, las constantes de los modelos lineales no difieren estadísticamente de 0 y las pendientes no difieren de 1. Por tanto, podemos decir que LTM-AIDFOREST estima adecuadamente

los valores medios del número de pies y del diámetro normal por parcela en comparación con el inventario clásico.

Tabla 1. Relación entre las variables a nivel parcela, obtenidas mediante inventario clásico (forcípulas) y mediante Lidar Terrestre Móvil y software de procesado AID-FOREST, en un monte de *Pinus halepensis*. Tamaño de la muestra=16 parcelas. n =número de pies por parcela mediante inventario clásico. nz =número de pies por parcela mediante inventario LTM-AIDFOREST; Dn (cm): diámetro normal medio por parcela obtenido mediante inventario clásico. Dnz (cm): diámetro normal medio por parcela obtenido con LTM-AIDFOREST.

	a_0		a_1		F	R^2 (%)	SEE
	M	EE	M	EE			
$Dn = a_0 + a_1 Dnz$	1.94 [†]	1.59	0.93 ^{††}	0.05	293.3	95.1	0.91
$n = a_0 + a_1 nz$	-0.33 [†]	1.00	1.00 ^{††}	0.04	585.1	97.5	2.09

M: valor medio del coeficiente obtenido mediante mínimos cuadrados. EE: error estándar del coeficiente. F de Snedecor. R^2 coeficiente de determinación ajustado con los grados de libertad. SEE: desviación típica residual.

† Constante del modelo no difiere estadísticamente de 0.

†† Pendiente del modelo no difiere estadísticamente de 1

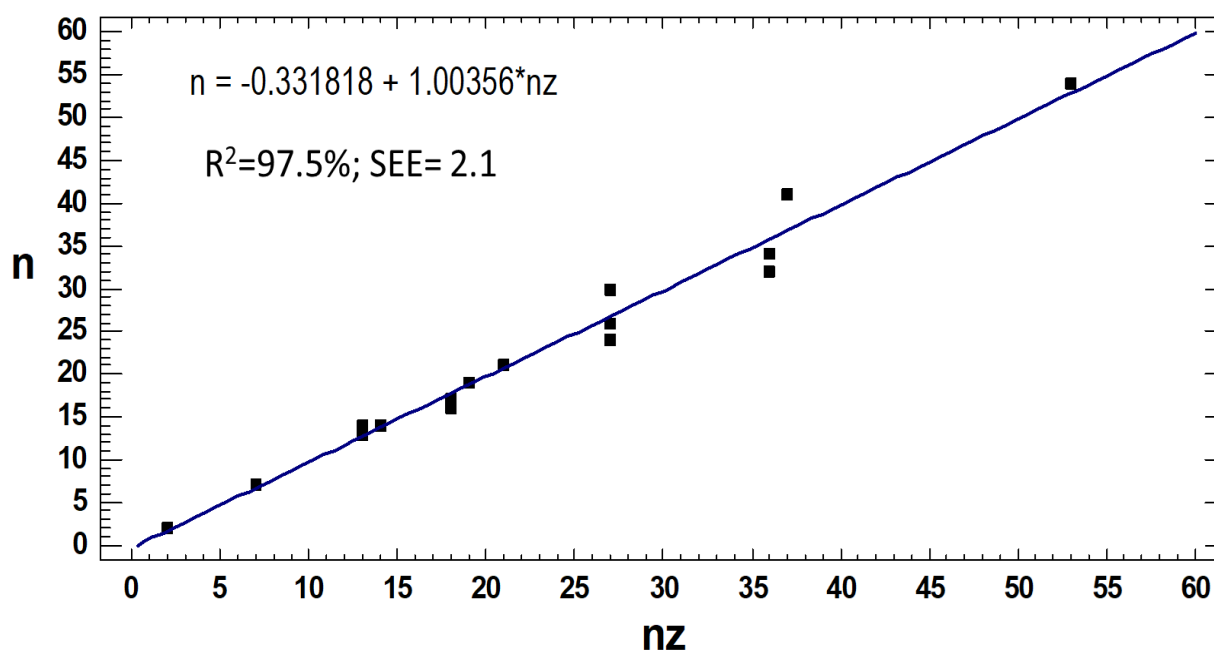


Figura 3. Relación lineal entre el número de pies por parcela obtenido con la técnica clásica de inventariación (n) y con la técnica LTM-AIDFOREST (nz), utilizando las 16 parcelas muestreadas en *Pinus halepensis*.

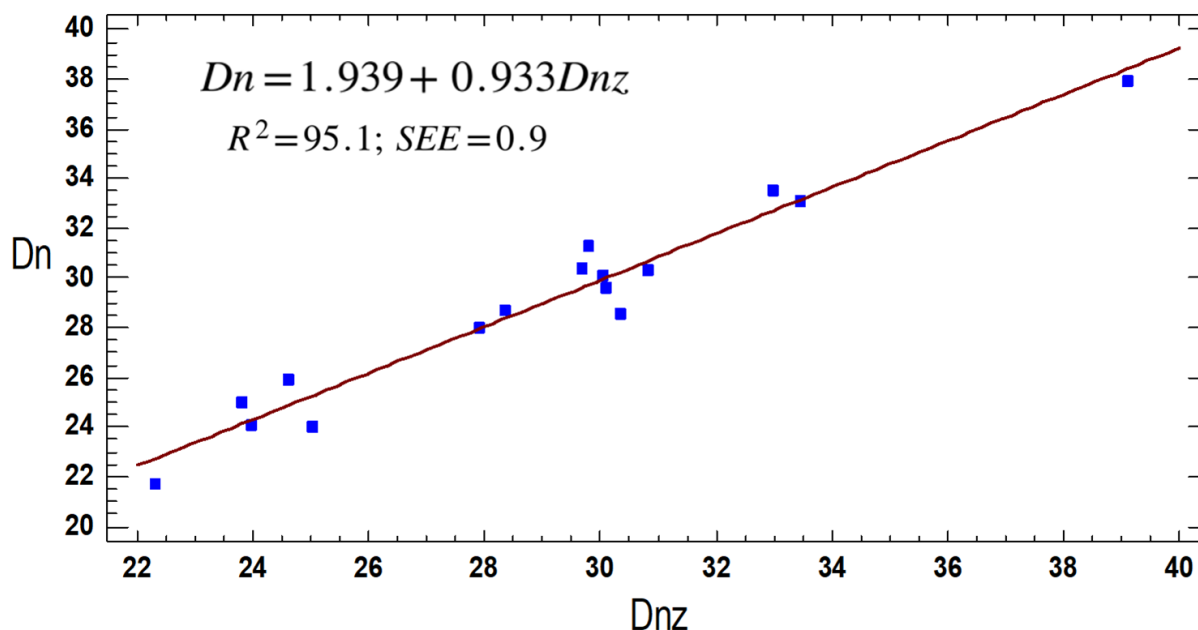


Figura 4. Relación lineal entre el diámetro normal medio por parcela obtenido con la técnica clásica de inventariación (D_n) y con la técnica LTM-AIDFOREST (D_{nz}), utilizando las 16 parcelas muestreadas en *Pinus halepensis*.

Utilizando todos los diámetros medidos en las 16 parcelas, se han calculado las distribuciones diamétricas obtenidas con ambas metodologías (Figura 5). Tal como se muestra en la Tabla 2, las distribuciones diamétricas acumuladas no difieren estadísticamente entre sí ($K-S=1.09$, $p=0.19$). De igual manera, los valores medios de los diámetros normales, las varianzas y las medianas tampoco difieren estadísticamente entre ambas metodologías de inventariación ($p>0.05$).

Tabla 2. Análisis descriptivo de la variable Diámetro normal obtenido con ambas técnicas de inventariación (D_n , inventariación clásica; D_{nz} , inventariación mediante LTM-AIDFOREST), en *Pinus halepensis*, utilizando conjuntamente todos los pies inventariados en las 16 parcelas de muestreo, así como la aplicación del test de hipótesis para la comparación de medias, medianas, varianzas y la forma de la distribución diamétrica acumulada, utilizando ambas técnicas.

	D_n (cm)	D_{nz}
nº de pies	364	368
Media	27.0	26.4
Varianza	37.3	32.2
Mediana	26.7	26.0
Coef. Asimetría estandarizado	0.8	2.4
Coef. Kurtosis estandarizado	-0.3	-0.1
Mínimo	10.9	13.5
Máximo	43.4	42.5

COMPARACIÓN DE AMBAS TÉCNICAS	Estadístico	p [†] (nivel sign.)
t-test comparación medias	1.18	0.24
F-test comparación ratio de varianzas	1.159	0.16
Wilcoxon test comparación medianas	63229	0.19
K-S test comparación distribuciones	1.09	0.19

† no significativo ($p > 0.05$)

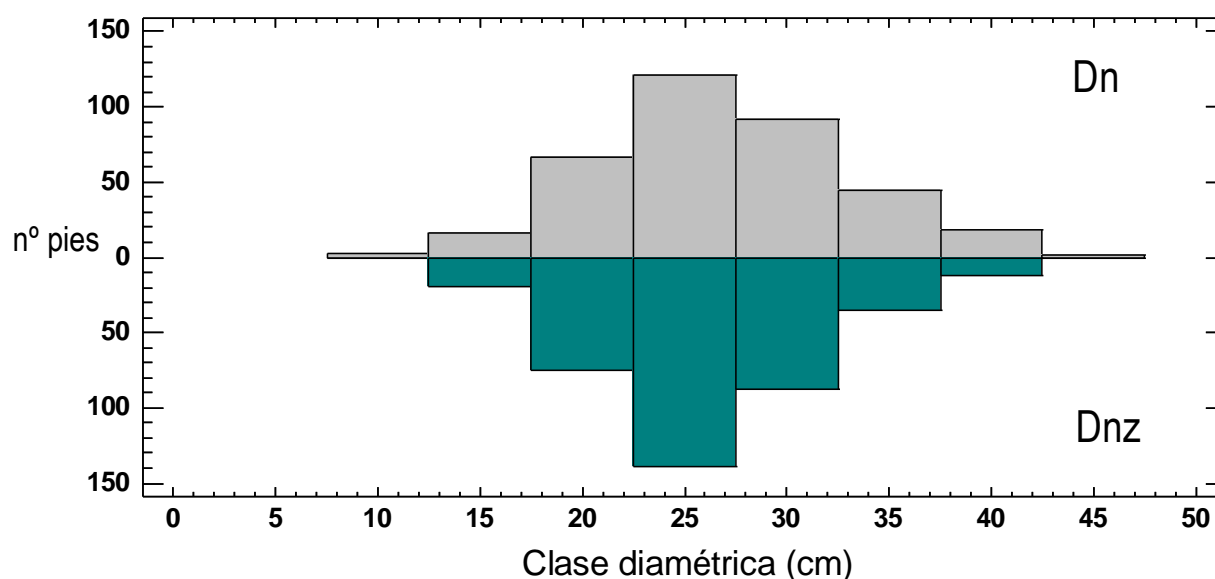


Figura 5. Distribuciones diamétricas de *Pinus halepensis* obtenidas con la técnica clásica de inventariación (Dn) y con la técnica LTM-AIDFOREST (Dnz) utilizando las 16 parcelas muestreadas.

Con relación a la validez de la metodología LTM-AIDFOREST para calcular los volúmenes totales del tronco del árbol, la Tabla 3 muestra la descripción de los diámetros medios, las alturas medias totales y los volúmenes medios (Dn, H, V) de los 9 pies apeados y cubicados por trozas en el suelo, así como la obtención de esos mismos parámetros mediante LTM-AIDFOREST (Dnz, Hz, Vz). Dado que los mismos pies han sido medidos por ambos métodos, el análisis más robusto es comprobar que la diferencia entre parámetros medidos con las dos técnicas no difiere estadísticamente de cero. Tal como explícitamente se muestra en la Tabla 3, ambas metodologías estiman de forma similar las tres variables.

Tabla 3. Análisis descriptivo de las variables diámetro normal, altura total y volumen total de tronco de 9 pies de *Fagus sylvatica* sin bifurcaciones obtenidas mediante apeo y cubicados por trozas (Dn, H, V, respectivamente), en comparación con las mismas variables obtenidas mediante LTM-AIDFOREST (Dnz, Hz, Vz). Comparación de las variables medias emparejadas mediante test de la T-student y nivel de significación.

	Dnz (cm)	Dn (cm)	Dn-Dnz (cm)	
nº de pies	9	9	9	
Media	44.5	43.7	0.78	
Varianza	159.4	137.3	7.82	
Mediana	43.0	45.0	0.00	
Mínimo	27.0	27.0	-2.50	
Máximo	62.5	61.0	7.00	
COMPARACIÓN MUESTRAS EMPAREJADAS			Estadístico	p
t-test comparación medias			0.83	0.43
	Hz (m)	H (m)	Hz-H (m)	
Media	26.2	26.6	-0.73	
Varianza	7.3	4.6	2.36	
Mediana	27.3	26.6	-1.10	
Mínimo	21.5	22.2	-2.60	
Máximo	29.4	29.5	1.40	
COMPARACIÓN MUESTRAS EMPAREJADAS			Estadístico	p
t-test comparación medias			-1.33	0.22
	Vz (m)	V (m)	Vz-V (m)	
Media	2.2	2.0	0.17	
Varianza	1.7	1.3	0.13	
Mediana	2.1	1.9	0.10	
Mínimo	0.7	0.6	-0.46	
Máximo	4.1	3.5	0.81	
COMPARACIÓN MUESTRAS EMPAREJADAS			Estadístico	p
t-test comparación medias			1.46	0.18

La Tabla 4 y Figuras 6, 7 y 8 confirman que AID-FOREST estima de forma inesgada los tres parámetros indicados a nivel árbol, dado que las constantes no difieren estadísticamente de cero y las pendientes no lo hacen con respecto a uno.

Tabla 4. Relación entre las variables a nivel árbol (diámetro normal, altura total y volumen total con corteza), obtenidas mediante inventario clásico (forcípulas) y mediante Lidar Terrestre Móvil y software de procesado AID-FOREST. Tamaño de la muestra=9 pies de *Fagus sylvatica*. El subíndice z indica que la variable es medida con LTM-AIDFOREST.

	a ₀		a ₁		F	R ² (%)	SEE
	M	EE	M	EE			
Dn = a ₀ +a ₁ Dnz	3.41 [†]	3.49 ^{††}	0.91	0.08	142.9	94.7	2.7
H = a ₀ +a ₁ Hz	9.64 [†]	4.86 ^{††}	0.65	0.19	12.21	67.1	1.3
V = a ₀ +a ₁ Vz	0.19 [†]	0.21 ^{††}	0.84	0.09	102.1	92.7	0.3

M: valor medio del coeficiente obtenido mediante mínimos cuadrados. EE: error estándar del coeficiente. F de Snedecor. R² coeficiente de determinación ajustado con los grados de libertad. SEE: desviación típica residual.

† Constante del modelo no difiere estadísticamente de 0.

†† Pendiente del modelo no difiere estadísticamente de 1.

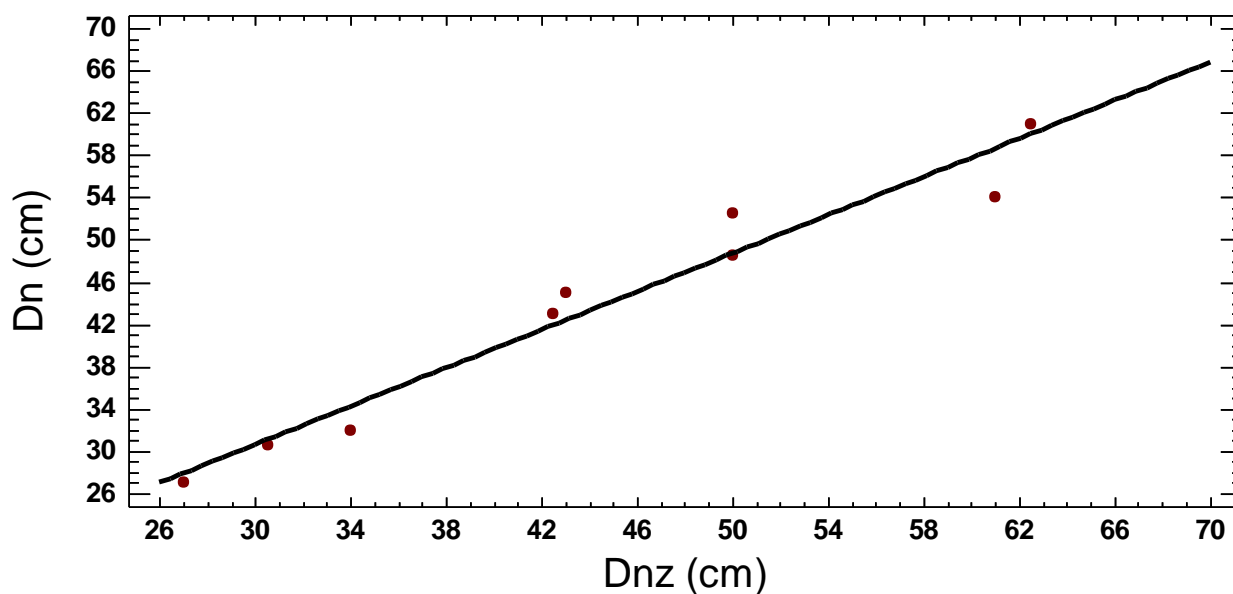


Figura 6. Relación lineal entre el diámetro normal del árbol obtenido con la técnica clásica de inventariación (Dn) y con la técnica LTM-AIDFOREST (Dnz). Numero de pies=9 de *Fagus sylvatica*

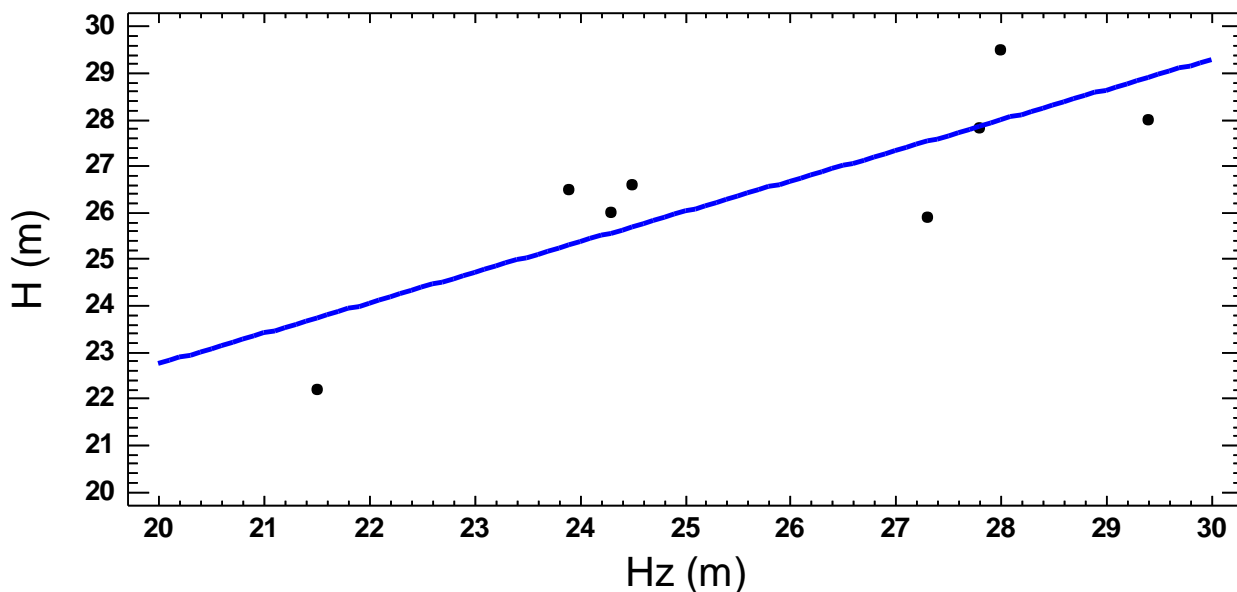


Figura 7. Relación lineal entre la altura total obtenida con la técnica clásica de inventariación (H) y con la técnica LTM-AIDFOREST (H_z), utilizando 9 árboles de *Fagus sylvatica*.

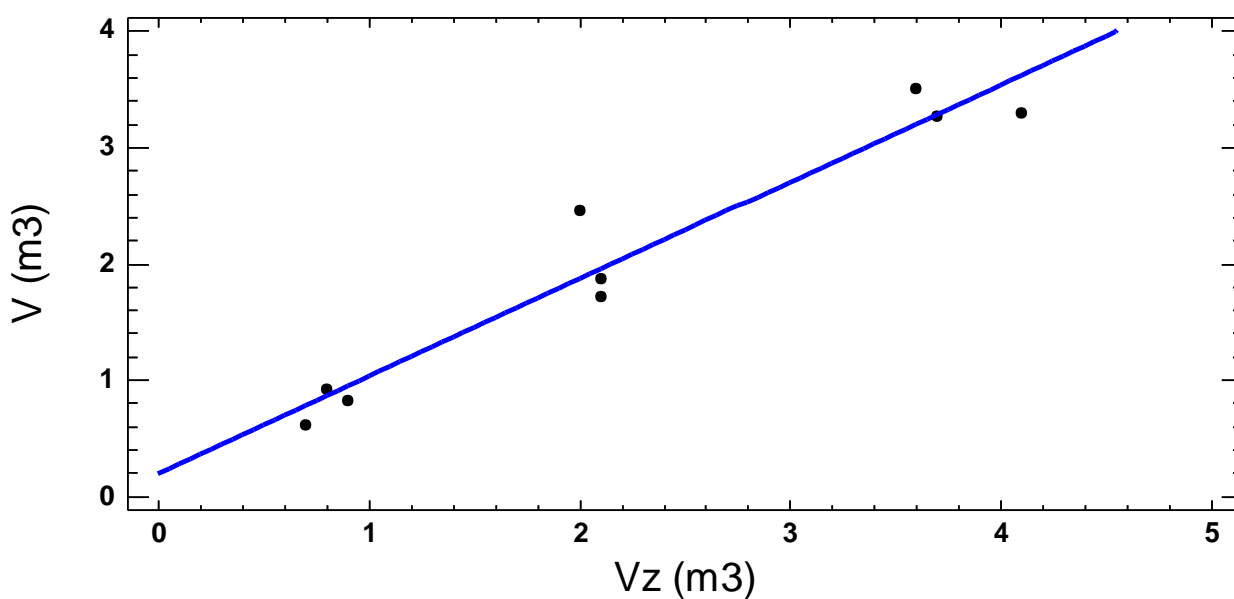


Figura 8. Relación lineal entre el volumen del tronco completo obtenido mediante la técnica clásica por trozas (V) y con la técnica LTM-AIDFOREST (V_z), utilizando 9 árboles de *Fagus sylvatica*.

5. Discusión

Los resultados a nivel parcela mostraron detecciones (número de pies detectados por AID-FOREST dividido por número de pies obtenidos en inventario clásico) próximas al 100% (media 102%, desviación estándar 2%, datos no mostrados). Esto indica que, incluso, AID-FOREST ha detectado algún árbol adicional al medido con forcípula. Probablemente esto es un problema de los árboles límite, que no fueron medidos con forcípula, pero sí que contabilizó AID-FOREST. Resultados publicados por otros autores muestran detecciones que oscilan entre el 22 y el 52% (Pfeifer and Winterhalder, 2004), dependiendo de si se realizaron uno o varios escaneos; podría deberse a que los

datos de la nube de puntos provenían de un láser terrestre fijo y no de un dispositivo móvil, por lo que el efecto ocultamiento de otros árboles impide la detección óptima. Othomani et al. 2011, utilizando el software “Computree” (desarrollado por la Office National des Forêts, Instituto Francés de gestión forestal de montes públicos), obtuvieron una tasa de detección promedio del 90,6%. En cualquier caso, estos últimos son métodos no automáticos que conllevan gran cantidad de trabajo en gabinete y no son adecuados para grandes extensiones de monte (pequeñas parcelas). Resultados propios (López-Serrano et al. 2022) muestran que ni la especie, tamaño de parcela ni la densidad de la misma, afectaron a la detectabilidad de los pies. Sin embargo, lo que llamamos índice de complejidad visual del ecosistema (esto es, la existencia de matorral abundante y alto, así como de árboles con ramas muy bajas, EVCI) sí que tuvo un efecto significativo en la capacidad de detección de AID-FOREST. Por tanto, AID-FOREST es capaz de procesar cualquier tamaño de superficie de parcela, desde parcelas pequeñas a cientos de hectáreas, sin ningún problema. El único problema está en las limitaciones de los equipos LIDAR para generar nubes de puntos de grandes superficies.

En cuanto a la estimación de número de pies por parcela y diámetros medios, AID-FOREST ha obtenido estimaciones insesgadas de ambos. Es cierto que AID-FOREST no es capaz de detectar pies menores de 8 cm, como consecuencia de que los modelos entrenados para aplicar inteligencia artificial nunca consideraron estos tamaños tan pequeños. En cuanto a la altura media, aunque no se han mostrado resultados, podemos adelantar que AID-FOREST la sobrestima entre 0.5 y 1.30 m, fundamentalmente porque el concepto de altura utilizado en las mediciones clásicas, una vez apeado el pie, no coincide con el concepto de altura que AID-FOREST da, esto es, la altura estimada con AID-FOREST se refiere a la altura máxima de la copa, que no coincide con lo medido con técnicas clásicas.

Se ha pretendido en este trabajo demostrar la utilidad de AID-FOREST en la detección de los árboles y la determinación de algunas variables dendro y dasométricas, p.e. los diámetros normales y su distribución. De igual manera, y de forma más precisa, se ha demostrado la utilidad del AID-FOREST para la cuantificación del diámetro normal, altura total y del volumen de árboles individuales, incluso en especies para las que no está diseñado, especies simpódicas, esto es, en las que el tronco principal se divide en varios troncos. Aunque no se ha mencionado de forma explícita -aunque si se ha mostrado en algunas figuras (6, 7, y 8)-, pues no era el objetivo de este trabajo, AID-FOREST estima a nivel masa todas aquellas variables dendro y dasométricas imprescindibles para una buena descripción de los cantones de inventario. Así, AID-FOREST obtiene como salida 4 archivos (dos archivos *.shp y dos archivos *.csv), donde aparecen las geolocalizaciones de los árboles que componen la parcela o unidad inventarial, las secciones detectadas en cada árbol para obtener el volumen del mismo, datos dendrométricos sintetizados a nivel árbol, datos dasométricos a nivel parcela y por hectárea (nº pies, área basimétrica, diámetro medio cuadrático, altura media, altura dominante, altura del primer verticilo de la copa y fracción de cabida cubierta) y un resumen a nivel cantón (en su caso) de los mismos parámetros medidos a nivel parcela, incluyendo el error de muestreo (si fuera el caso) al 95% de probabilidad.

Lidar terrestre móvil (LTM) permite generar nubes de puntos muy precisas (ruido de 1-3 cm) tanto del vuelo como del suelo, por lo que es apto para generar tanto los modelos digitales del terreno (MDT) y los modelos digitales de superficie (MDS), quedando así perfectamente descrito el ecosistema arbóreo a efectos de extraer toda la información posible del mismo. Lidar aéreo (LA) tiene la ventaja de capturar información de grandes superficies, pero no da buenas calidades de nubes de puntos para que puedan ser detectados los árboles y cubicados. Ambas herramientas se podrían integrar a la hora de la realización de inventarios por muestreo más avanzados, como los muestreos con estimadores de regresión y razón (De Vries, 1986), donde la variable auxiliar poblacional se podría obtener con precisión gracias al LA, y las variables de interés y auxiliar a nivel parcela se podrían obtener con LTM.

Finalmente, si bien el coste del equipo de Lidar puede parecer relativamente alto, la realidad indica que se amortiza rápidamente en muy pocos inventarios realizados. Téngase en cuenta que una parcela de 30 x 30 m es escaneada en menos de 3 minutos, y una hectárea en aproximadamente 20-

40 minutos. Y AID-FOREST procesa estas nubes de puntos en 10-60 minutos respectivamente, y totalmente de forma automática sin operador, por lo que todo este trabajo computacional puede hacerse en horas de descanso (de 23 h a 7 h). De acuerdo con López-Serrano et al. (2022), escalando los resultados obtenidos en parcelas de diferentes tamaños (600-35000 m²), se estima que un inventario clásico, donde se miden todos los diámetros normales más una muestra de 10-20 pies para las alturas, el tiempo medio es de 252 min/ha. Por el contrario, la realización de un inventario con LTM invierte de media 22 min/ha, el procesado de datos brutos unos 57 min/ha, procesamiento de datos con AID-FOREST invierte un total de 66 min/ha. Por tanto, un inventario completo con la metodología LTM-AIDFOREST que proponemos, invertiría un total de 145 min/ha (el 57% del tiempo empleado en un inventario clásico de campo, sin contabilizar el trabajo de gabinete). Teniendo en cuenta que sólo un 15% del tiempo mencionado es trabajo de escaneado de campo, el 39% es un tiempo dedicado a procesado semiautomático de la nube bruta de puntos y un 46% es procesado totalmente automático de AID-FOREST, podríamos concluir que es altamente ventajoso frente al duro inventario clásico. Finalmente tenemos que indicar que la rapidez tanto del procesado de nubes brutas como el realizado por AID-FOREST, depende considerablemente de la potencia del ordenador, esto es, la memoria RAM y la tarjeta gráfica, por lo que los tiempos indicados de procesado pueden todavía reducirse mucho más, incluso a la mitad (López-Serrano et al., 2022).

6. Conclusiones

Los inventarios forestales representan la mayor parte del presupuesto de la ordenación del monte. Por esta razón, y por la dureza del trabajo, se intenta minimizar al máximo dentro de unos límites razonables. Ello provoca que las estimaciones de parámetros dasométricos a nivel cantón, obtenidas mediante un muestreo por parcelas muy limitado, tengan un alto nivel de error y, por el contrario, si se hacen por conteo pie a pie, el coste puede llegar a ser inasumible. Mediante este sencillo trabajo aquí presentado, se ha demostrado, independientemente del tipo de masa, que LTM-AIDFOREST supone un nuevo enfoque y una nueva alternativa a los clásicos inventarios, dado que ahorra mucho tiempo (asunto aquí no tratado ni cuantificado) e incrementa la precisión, dado que si se hace mediante muestreo se pueden realizar por jornada muchas parcelas de tamaños relativamente grandes; y si se hace por conteo pie a pie, el ahorro de tiempo también sería significativo.

Por tanto, el procesado de nubes de puntos mediante AID-FOREST supone un avance significativo y un nuevo enfoque en la inventariación forestal, gracias a que es un software totalmente automatizado e ilimitado en la cantidad de datos a procesar

7. Agradecimientos

Trabajo cofinanciado por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación con la gestión de la Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Política Forestal (Grupo Operativo Monte Digital, ref. 2018 0020012125) y por el Programa Nacional de Proyectos de Investigación Fundamental, Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad (CGL2017-83538-C3). También agradecemos las facilidades dadas por la Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica de la Comunidad Valenciana, de la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha, así como al Gobierno de Navarra, el Servicio Forestal y Cinegético y el Guarderío de Medio Ambiente, por las facilidades dadas para realizar los trabajos de campo. Agradecemos el trabajo de campo desarrollado por la empresa BASARTEA, así como por la evaluación y aplicación de AID-FOREST y a la empresa GRAFINTA SL, por el apoyo técnico en el manejo del ZEB-HORIZON y del software Geoslam HUB y DRAW.

8. Bibliografía

BOGDANOVICH, E.; PEREZ-PRIEGO, O.; EL-MADANY, T.S.; GUDERLE M.; PACHECO-LABRADOR, J.; LEVICK, S.R.; MORENO, G.; CARRARA, A.; MARTÍN M.P.; MIGLIAVACCA, M.; 2021. Using terrestrial laser scanning for characterizing tree structural parameters and their changes under different management in a Mediterranean open Woodland. *Forest Ecology and Management* 486 (2021) 118945

DE VRIES, P.G. 1986. *Sampling Theory for Forest Inventory. A Teach-Yourself Course.* Springer, Berlin, Heidelberg. 400 pp.

HUANG, J.; RATHOD, V.; SUN, C.; ZHU, M.; KORATTIKARA, A.; FATHI, A. ; FISCHER, I. ; WOJNA, Z.; SONG, Y.; GUADARRAMA, S.; MURPHY, K.; 2017. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors. *CVPR 2017*. arXiv:1611.10012v3 [cs.CV]

LOPEZ-SERRANO, FR; RUBIO, E.; GARCÍA-MOROTE, F.A.; ANDRÉS ABELLÁN, M., PICAZO CÓRDOBA, M.I.; WIC, C.; GARCÍA SAUCEDO, F.; SÁNCHEZ GARCÍA, J.M.; SERENA INNERARITY, J.; CARRASCO LUCAS, L., GARCÍA GONZÁLEZ, O.; GARCÍA GONZÁLEZ, J.C.; 2022. Artificial intelligence-based software (AID-FOREST) for tree detection: a new paradigm for fast and accurate forest inventories using point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (EN REVISIÓN).

NETER, J.; KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; WASSERMAN, W.; 1996. *Applied Linear Statistical Models*, fourth ed. Irwin. 1408 Chicago.

OTHMANI, A.; PIBOULE, A.; KREBS, M.; STOLZ, C.; LEW YAN VOON, L.F.C.; 2011. Towards automated and operational forest inventories with T-Lidar. 11th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems (SilviLaser2011), Hobart, Australia. hal-00646403.

PFEIFER, N.; WINTERHALDER, D.; 2004, Modelling of tree cross sections from terrestrial laser-scanning data with free-form curves. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 76–81.

SAFAIE, A.H.; RASTIVEIS, H.; SHAMS, A.; SARASUA, W.A.; LI, J.; 2021. Automated street tree inventory using mobile LiDAR point clouds based on Hough transform and active contours. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 174 (2021) 19–34.