



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



## Proyecto GO FAGUS: Metodologías para optimizar inventario, silvicultura y aprovechamiento de *Fagus sylvatica* L. hacia productos de mayor valor añadido

MERLO SÁNCHEZ, E.<sup>1</sup>, CANTERO, A.<sup>2</sup>, VEGA CUETO, A.<sup>3</sup>, ALONSO PONCE, R.<sup>4,8</sup>, LASALA, D.<sup>5</sup>, BERMEJO BARBIER, I.<sup>6</sup>, VILLANUEVA, J.L.<sup>7</sup>.

<sup>1</sup> Madera Plus Calidad Forestal S.L.

<sup>2</sup> Fundación HAZI Fundazioa.

<sup>3</sup> Centro Tecnológico Forestal de la Madera de Asturias (CETEMAS).

<sup>4</sup> föra forest technologies S.L.L.

<sup>5</sup> Agresta S. Coop.

<sup>6</sup> Ademan. Asociación de Empresarios de la Madera de Navarra.

<sup>7</sup> Cesefor.

<sup>8</sup> Instituto Universitario de Investigación Gestión Forestal Sostenible iuFOR.

### Resumen

El proyecto GO FAGUS (2021-2023) busca revalorizar económicamente los hayedos, a través de herramientas optimizadas dirigidas a la gestión, la clasificación y el desarrollo de nuevos productos de madera de haya. En su fase inicial, se han elegido 30 parcelas representativas de diversos tipos de hayedo del Norte de España y en ellas se han testado tecnologías para obtención de parámetros de inventario forestal y caracterización de propiedades tecnológicas de la madera en pie (resistógrafo, equipo sónico, laser terrestre y LiDAR aerotransportado). Diversas empresas e instituciones socias del proyecto han colaborado aportando herramientas y técnicas innovadoras así como nuevos enfoques desde la Administración Forestal, rematantes y aserraderos con el fin de contrastar resultados respecto a métodos tradicionales. Se ha analizado la variabilidad existente entre parcelas para las diferentes variables evaluadas y se proponen metodologías que permitirán optimizar la silvicultura y el aprovechamiento de esta especie hacia productos de mayor valor añadido.

### Palabras clave

Resistógrafo, sónicos, laser, LiDAR, Modulo dinámico de elasticidad, densidad de madera, calidad estructural.

## 1. Introducción

El haya (*Fagus sylvatica* L.) es una de las especies de frondosas más extendidas a nivel europeo. En España, ocupa un total de 387.776 ha con una presencia más abundante en Navarra (32%), Asturias (17,6%), Castilla y León (13,97%) y País Vasco (12,8%). Suele formar bosques monoespecíficos con un escaso estrato de matorral (casi el 40% de los hayedos de España) y las especies arbóreas que con mayor frecuencia la acompañan son frondosas (87%), destacando el género *Quercus*, que aparece como segunda especie en más de 130.000 ha.

El haya ha sido una tradicional fuente de leña y carbón vegetal. Debido a este secular uso, presenta actualmente una gran extensión de masas en forma de monte bajo (brotes de cepa y trasmochos), con árboles de considerable edad. En general en Europa, dos tercios de la cosecha anual de madera de haya se utilizan para pulpa y papel o como leña y solo madera en rollo de grandes dimensiones se dedica a la producción de madera aserrada. En cuanto al rendimiento económico, el precio medio de licitación de la venta de madera en pie de haya en España es muy bajo. Según MADEREA, en 2017 fue de 17,09 €/m<sup>3</sup>, siendo uno de los precios más bajos de frondosa, por debajo del castaño (20,7 €/m<sup>3</sup>) o de roble (22 €/m<sup>3</sup>) y menos de la mitad de lo que se

paga por el chopo (43,18 €/m<sup>3</sup>). En el caso de madera de haya para leña el precio por tonelada en pie fue de 13,29 €/T.

Actualmente, el haya ha demostrado en otros países un gran potencial en el uso como madera maciza y especialmente en la producción de productos estructurales encolados (e.g EHRHART et al. 2020). En este contexto, la producción de tablas de madera técnica para uso estructural, madera laminada y CLT podría ser una opción de uso interesante para la madera en rollo de haya de calidad media y baja, que permitiría conseguir mayor valor añadido y un precio más elevado. La especie está siendo caracterizada y se están desarrollando normas en diferentes países europeos para permitir su uso como madera estructural (BRUNETTI et al, 2020). El valor medio del módulo de elasticidad de *F. sylvatica* en Europa oscila entre 10.500 y 14.000 N/mm<sup>2</sup> muy superior a los valores de *Pinus radiata* (9.000-11.000 N/mm<sup>2</sup>) o *P. sylvestris* (9.500-11.500 N/mm<sup>2</sup>). Esto implica, para el haya, una ventaja competitiva de cara a optimizar la resistencia de productos técnicos para la construcción.

## 2. Objetivos

En el marco del proyecto GO FAGUS se pretende poner en valor la calidad técnica de la madera de esta especie, incluyendo masas de diámetro intermedio y analizando su adecuación para uso estructural. En este contexto, consideramos fundamental proponer metodologías que permitan realizar una selección desde el monte y caracterizar la calidad tecnológica e industrial de la madera de esta especie a partir de mediciones obtenidas sobre los árboles de la masa y de datos remotos.

## 3. Metodología

### Selección de parcelas de haya representativas del área de distribución

Por razones logísticas, se han seleccionado 30 masas de haya, de distintas calidades, distribuidas en las provincias de Álava, Burgos, Guipúzcoa, La Rioja y Navarra (territorio "GO\_FAGUS") donde se ubican casi tres cuartas partes del total de los hayedos puros de España y habiendo comprobado que los hayedos de estas zonas constituían una muestra representativa del total nacional. Para ello, se utilizaron las bases de datos del Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4) comparando las distribuciones de las principales variables dasométricas en el total del área de hayedos puros de España con las del área logísticamente viable (territorio "GO\_FAGUS"). Para todo el territorio español se seleccionaron 1.424 parcelas de hayedos puros (más de un 90% de pies de haya), de las cuales 1.046 (73,5%) se encuentran dentro del territorio GO\_FAGUS. Se generaron histogramas para las principales variables dasométricas (Figura 1), observándose que los hayedos del territorio GO\_FAGUS son un excelente representante del conjunto de los hayedos puros españoles, ya que no se detectan discrepancias en la distribución de ninguna de las variables entre ambos territorios.

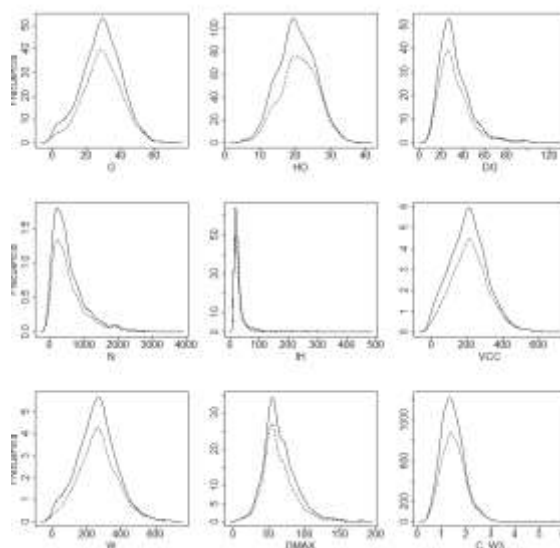


Figura 1. Histogramas de distribución de las principales variables dasométricas en España (línea continua) y el territorio GO\_FAGUS (línea discontinua).

Para llevar a cabo la selección de las masas dentro de esta zona de estudio, se definieron distintas tipologías de masas puras de haya en función de algunas variables de masa obtenidas del análisis preliminar de datos LiDAR y en concreto de la Fracción de cubierta de cubierta (FCC), el diámetro medio cuadrático (Dg) y la altura dominante (P95). A partir de la combinación de dichos parámetros se crearon 6 tipologías distintas descritas en la tabla 1. Se excluyeron del estudio masas con FCC menor del 70%, Dg menores de 20 cm y P95 menores de 18 m.

Tabla 1. Tipologías de hayedos definidas para el estudio

FCC	Dg	P95 ( se asimila a Ho)	% de representatividad respecto al global de hayedos puros	TIPOLOGÍA
<70	-	-	28,75%	excluido del estudio
>70	20-30	18-24	29,36%	<b>1</b>
>70	30-40	18-24	11,96%	<b>2</b>
>70	>40	18-24	0,01%	<b>3</b>
>70	20-30	>24	3,10%	<b>4</b>
>70	30-40	>24	25,18%	<b>5</b>
>70	>40	>24	1,64%	<b>6</b>

Las tipologías definidas permitieron estratificar toda la zona de interés (Figura 2) con el fin de optimizar la ubicación final de 30 masas sobre las que se ha realizado el estudio, consiguiendo una distribución equilibrada de parcelas en cada tipología, proporcional a su representatividad

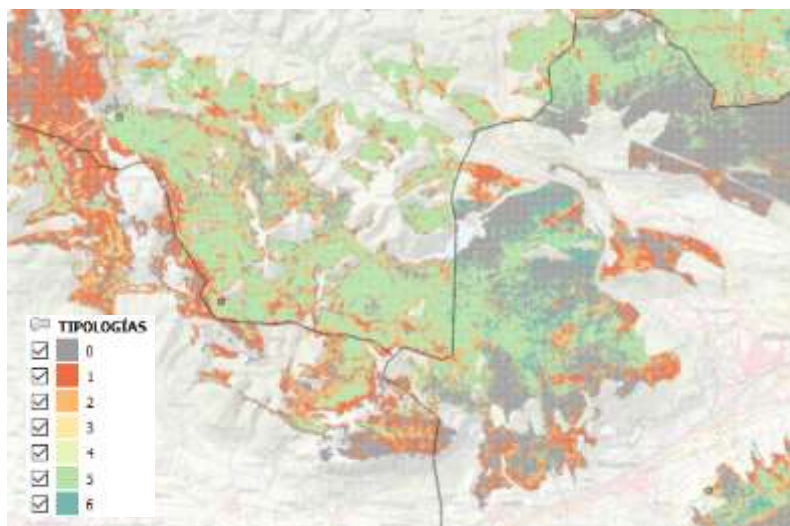


Figura 2. Ejemplo de cartografía de tipologías definidas en la zona de confluencia de Álava, Guipúzcoa y Navarra. La tipología 0 se excluyó del estudio.

En la caracterización final de las masas se han considerado, además, las regiones de procedencia definidas para la especie en España (Figura 3), estando representadas dentro de la selección definitiva de hayedos las regiones de procedencia 5, 6, 7, 8, 9 y 17.

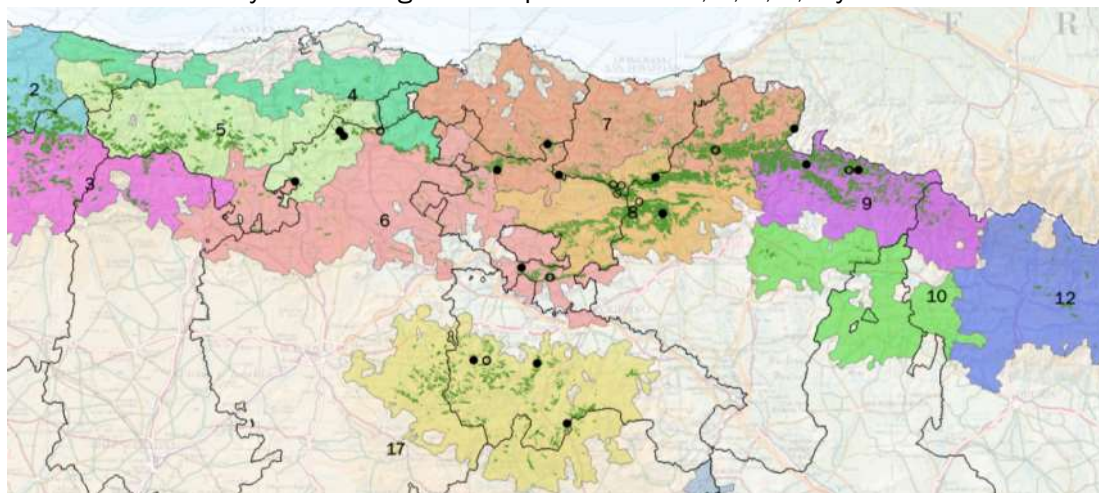


Figura 3. Mapa de localización de las parcelas evaluadas, dentro del área de distribución de la especie (verde oscuro). Los círculos sin rellenar son las parcelas en las que, además, se han apeado y extraído pies a aserradero. Además, se muestran en distintos colores las regiones de procedencia de *Fagus sylvatica*.

#### **Captura de datos:**

Sobre cada una de estas 30 masas se ha establecido una parcela de 15 metros de radio (707 m<sup>2</sup>) ubicada en una zona representativa dentro de cada masa y se han llevado a cabo diferentes caracterizaciones:

**Dendrometría y Dasimetría:** Se midieron los diámetros normales de todos los árboles inventariables ( $dn > 7,5$  cm), se anotó su especie y se tomó una muestra de alturas totales suficiente para computar la altura dominante según el criterio de Assmann. Con esta información se derivaron una serie de variables dasométricas que posteriormente se ajustaron como variables dependientes en función de métricas LiDAR mediante métodos de masa.



**LiDAR aerotransportado:** la información LiDAR se obtuvo de los productos disponibles en el Plan Nacional de Ortofografía Aérea (PNOA), en sus dos coberturas. En el caso de la provincia de Burgos, sólo se cuenta con la primera cobertura, por lo que las parcelas de esta provincia fueron excluidas de este análisis. Los datos LiDAR fueron procesados con el software easyLaz (ALONSO PONCE et al. 2018), una herramienta propia de for forest technologies basada en el ecosistema FUSION/LDV (MCGAUGHEY 2021). En cada parcela se calcularon un total de 56 métricas relativas a la posición (media, percentiles, máximo, mínimo, mediana) y a la dispersión (varianza, desviaciones respecto a la media y la mediana, coeficiente de variación, intervalo intercuartílico, asimetría, curtosis, momentos-L) de la distribución de alturas normalizadas de los retornos, así como a la cobertura (distintas proporciones de los retornos). Todos los retornos por debajo de 2 m de altura fueron excluidos del cálculo de métricas con el fin de reducir el ruido introducido por la vegetación baja no arbórea.

**Laser terrestre:** Se han escaneado las 30 parcelas de campo con diversos tipos de láser fijos y de mano, en verano, es decir, antes de perder la hoja y de cortarse las hayas muestreadas. Algunas de esas parcelas, además, han sido fotografiadas y sobrevoladas con dron con el fin de construir modelos fotogramétricos y nubes de puntos complementarias de esas mismas parcelas. Actualmente, se están repitiendo estas mediciones en época invernal, con el fin de poder comparar resultados y aconsejar sobre el método más efectivo de empleo de estas técnicas innovadoras de inventario forestal en cuanto a coste/resultados y época de medición. El objetivo de estas mediciones va a ser la mejora de las actuales ecuaciones de cubicación del haya.

**Clasificación de calidad visual:** Se evaluó una muestra de diez árboles representativos en cada parcela de muestreo, realizando una clasificación de calidad visual de las dos primeras trozas sobre el fuste. Se han establecido 5 calidades visuales (A, B, C, D, E) que han sido asignadas a las dos primeras trozas potenciales de 3m sobre el fuste. Dicha propuesta, se ha elaborado para asignar una clasificación visual en pie (importante distinguir de otros dos conceptos: clasificación visual de madera en rollo o de la clasificación visual de madera aserrada) específica para el haya para ser utilizada en la península ibérica. La clasificación se ha realizado a partir de la norma UNE EN 1316-1 (Madera en rollo de frondosas. Clasificación de calidades. Parte 1 Roble y haya) pero utilizando sólo los parámetros o singularidades que son observables o medibles observando el árbol en pie y se ha ampliado con los parámetros mínimos requeridos por la industria de la madera del haya a la hora de generar un producto o darle un destino. Además, también se ha medido la longitud de los primeros centímetros basales de los árboles que se consideraban que rebajaban mucho la calidad del árbol.

**Extracción de cores:** Se realizó sobre los 10 árboles evaluados visualmente, con ayuda de un taladro para facilitar la perforación del árbol con barrena de Pressler. Sirvió para calcular la densidad verde y densidad básica de la madera. Consiste en extraer un cilindro de madera de 5mm de diámetro y longitud variable (core) generalmente hasta la médula. Los cores fueron conservados en frío para calcular el volumen y la densidad en verde y posteriormente secados en estufa para poder estimar el peso seco y de ahí, junto con el volumen en verde, obtener la densidad básica.

**Metodología sónica:** Se aplicó sobre los mismos 10 árboles. El método consiste en evaluar la velocidad de propagación de una onda de impacto por el interior de la fibra de la madera, en sentido longitudinal sobre el tronco. Se ha utilizado el equipo Hitman ST300 (fibre gen, NZ) que consta de dos transductores que se insertan en el fuste en sentido longitudinal a una distancia aproximada de 1m, centrado a la altura de 1,30m (Fig 3a). El equipo tiene un sistema láser de medición de distancia entre transductores y posteriormente golpeando con un martillo, en uno de ellos, se genera una onda de impacto que es recepcionada en el otro transductor y que con la distancia conocida, permite obtener la velocidad. A partir de la velocidad de propagación obtenida sobre el fuste y la densidad verde se calculó el módulo dinámico mediante la fórmula:

$$MOE_{din} = V^2 * \rho$$

Siendo V la velocidad de desplazamiento de onda acústica en el interior de la madera en sentido longitudinal de la fibra y  $\rho$  la densidad de la madera en el momento de medición.



Figura 3. Metodologías utilizadas en campo para caracterización de las masas: a) Extracción de cores con barrena de Pressler, b) Estimación de velocidad de desplazamiento con ST300 (fibre-gen) c) Obtención de perfil resistográfico mediante el equipo 4450S (Rinntech), d) Obtención de perfil resistográfico mediante el equipo modelo IML-RESI PD500, e) láser escáner de mano cerca del centro de la parcela, f) láser escáner fijo en centro de la parcela. Las hayas muestreadas aparecen numeradas con el fin de facilitar su posicionamiento en los modelos fotogramétricos

**Técnicas resistográficas.** Dicha técnica consiste en la perforación, a velocidad constante, del tronco en sentido perpendicular a la fibra con una varilla metálica de 3 mm de diámetro de punta y la obtención de un perfil de resistencia a lo largo del mismo. Fueron empleados dos equipos resistográficos distintos: modelo 4450S del fabricante *Rinntech* y modelo IML-RESI PD500. Esta técnica permite obtener parámetros resistentes a lo largo del perfil (resistencia al avance de la varilla, en porcentaje de esfuerzo y, en el caso del IML, también resistencia a la rotación de la varilla), los cuales pueden ser relacionados con la densidad de la madera. Las 300 hayas representativas de las 30 parcelas de campo han sido muestreadas hasta una profundidad de 50 cm con el resistógrafo IML-RESI y, además, una submuestra de 50 hayas de 5 parcelas navarras han sido muestreadas con el resistógrafo *Rinntech* en las mismas fechas. Los perfiles se compararon con los datos de densidad básica obtenidos a partir de los cores previamente extraídos y procesados en laboratorio. Los parámetros obtenidos de las mediciones mediante resistógrafo fueron empleadas en la construcción de modelos de estimación de la densidad básica mediante regresión.

#### 4. Resultados

##### Variables descriptivas de los hayedos evaluados

En la Tabla 2 se muestran las principales variables evaluadas sobre las masas de este estudio en cuanto a variables de masa y propiedades tecnológicas de la madera. Podemos observar que se trata de árboles de dimensiones intermedias, típicos de los obtenidos en las claras de los hayedos sobre los que se realizan actuaciones selvícolas, con un número muy variables de pies por ha (entre 200 y 1.200) y con diámetros de 20 a 50cm y alturas dominantes desde 16 a 40 metros. En cuanto a la madera, se observan unos valores muy estables de densidad básica entre parcelas con valores entre 571 y 633 Kg/m<sup>3</sup> una desviación estándar de apenas 16Kg/m<sup>3</sup> pero, sin embargo se aprecia una enorme variabilidad en el módulo de elasticidad dinámico con valores entre 13.000 a 21.000 N/mm<sup>2</sup>.

Tabla 2. Resumen de las variables dasométricas básicas y propiedades tecnológicas de la madera de las 30 parcelas muestreadas. N: densidad (pies/ha); G: área basimétrica (m<sup>2</sup>/ha); DG: diámetro medio cuadrático (cm); DMAX: diámetro máximo (cm); HO: altura dominante (m); IH: índice de Hart-Becking (%); VCC: volumen en pie con corteza (m<sup>3</sup>/ha); W: biomasa total (T/ha); D<sub>b</sub>: densidad básica (Kg/m<sup>3</sup>); MOE<sub>din</sub>: Módulo de elasticidad dinámico (N/mm<sup>2</sup>)

Variable	media	mín	máx	sd
N	560,5	208,0	1232,0	268,5
G	39,6	19,6	54,0	9,1
DG	32,4	19,1	54,3	8,7
DMAX	52,7	26,0	80,0	12,4
HO	25,5	16,7	40,6	5,7
IH	18,3	12,0	27,6	3,8
VCC	448,1	151,8	879,7	174,2
W	379,8	151,7	602,5	114,1
D <sub>b</sub>	604	571	633	16
MOE <sub>din</sub>	18.029	13.014	21.006	1.846

##### Estimación de variables dasométricas a partir de métricas LiDAR por métodos de masa.

En la Tabla 3 se resumen los resultados de los modelos obtenidos así como la bondad del ajuste. Así mismo, en la Figura 4 se presentan los gráficos de observados frente a predichos de las siete variables ajustadas.

Tabla 3. Resultados de las ecuaciones LiDAR obtenidas y bondad del ajuste. a<sub>0</sub>-a<sub>5</sub>: parámetros ajustados; RMSE y %RMSE: error medio cuadrático (en términos absolutos y relativos); ME lativos); ME y % ME: sesgo (en términos absolutos y relativos); p.ME: significancia del sesgo con respecto a 0; EF: eficiencia del modelo (en tanto por uno).

Variable	N	G	DG	DMAX	HO	VCC	W
a <sub>0</sub>	3374,9	27,0	10,9	49,9	9,7	325,0	294,4
a <sub>1</sub>	0,608	0,636	1,166	0,161	0,029	0,058	0,037
a <sub>2</sub>	-0,520	-0,528	0,037	0,018	-0,018	-0,695	-0,012
a <sub>3</sub>	-0,731	-0,751		-0,004	0,057	-0,005	
a <sub>4</sub>	-2,395						
a <sub>5</sub>	-0,074						
RMSE	152,6	3,0	3,4	5,9	1,7	56,0	46,6
%RMSE	31,0	7,2	9,6	11,3	6,2	12,2	11,8
ME	-16,56	-0,01	-0,14	-0,11	-0,07	0,07	-0,23
%ME	3,37	0,03	0,39	0,22	0,25	0,02	0,06



p,ME	0,631	0,987	0,876	0,926	0,873	0,996	0,983
EF	0,530	0,808	0,814	0,485	0,934	0,881	0,771

Todos los parámetros resultaron significativos ( $p < 0,05$ ), y no se detecta sesgo significativo global para ninguna de las ecuaciones ajustadas. Los errores medios cuadráticos oscilan entre el 6,2% para la altura dominante y el 31,0% para la densidad.

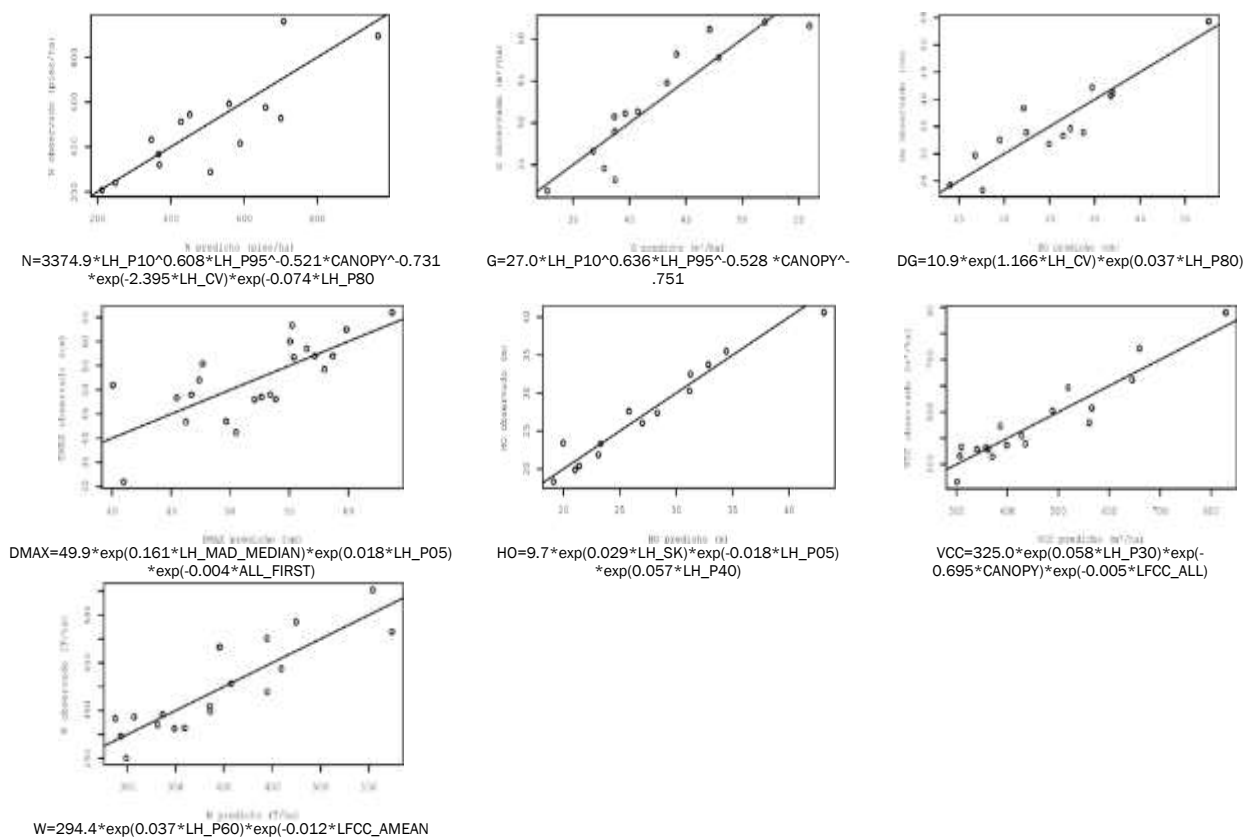


Figura 4. Gráficos de valores observados frente a predichos para las 7 variables modelizadas mediante métodos de masa y formulación bajo el gráfico de las ecuaciones resultantes ajustadas.

### Calidad visual sobre el fuste:

De la clasificación visual en pie de 600 trozas, los datos arrojan los siguientes datos preliminares de calidad del ámbito de estudio:

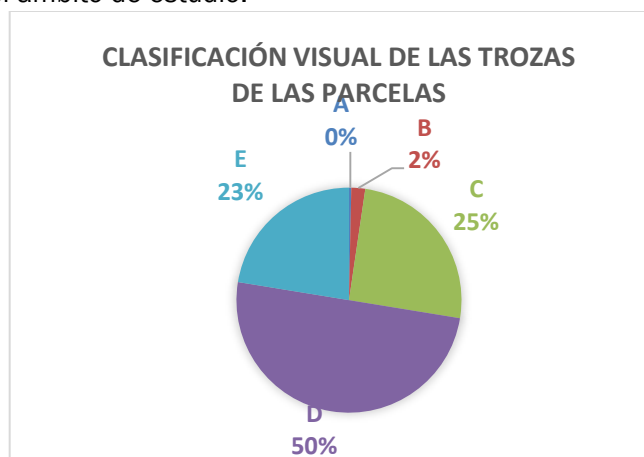


Figura 5. Clasificación visual en pie (en monte) de las trozas de las parcelas del proyecto.

El proyecto persigue centrarse en las clases D y C que son las más valorizables en la actualidad. Y como se ve en la figura anterior el peso de estas clases visuales es del 75% en el ámbito de estudio. Luego estos datos confirman el gran potencial que tienen los hayedos para poder revalorizarlos.

Los resultados de las mediciones de los defectos basales del haya, muestran que de promedio, de los 300 árboles medidos, sin encontrar diferencias entre diámetros, ni por calidades de la troza basal, ni regiones de procedencia ni por provincias, en la parte basal de las hayas se pierden 40 cm (de alto). Este dato es relevante a la hora de estimar el volumen de madera. Se considera que este parámetro está poco estudiado y poco valorado. Los defectos principales detectados curvatura basal, serias cavidades en la base, fuertes contrafuertes, fendas y nudos mal cerrados o dendrotelms.



Figura 6. Ejemplo árbol con troza de calidad visual B con un fuerte defecto basal que llega hasta casi 1 metro.

En siguientes anualidades del proyecto se podrá comparar la clasificación visual de las trozas medidas en pie con las trozas cortadas y llevadas a aserradero. De este modo se podrá generar una relación entre calidad visual en pie, calidad visual en rollo en cargadero y calidad visual en tabla. Como consecuencia de este esfuerzo de trazabilidad, se podrá mejorar las técnicas y propuestas de clasificación visual en pie para generar una guía práctica para que tanto de maderistas, consultores, gestores como de propietarios sepan identificar la calidad del hayedo de forma fácil, útil y muy fiable.

#### **Estimación de variables tecnológicas a partir de mediciones sobre el árbol en pie**

La metodología sónica y la extracción de cores nos han permitido calcular el módulo de elasticidad dinámico y de la densidad básica en cada árbol y analizar la variabilidad existente en dichos caracteres a lo largo del área de distribución de la especie. Se han observado diferencias significativas entre las parcelas muestreadas. Si agrupamos por región de procedencia dentro de la especie, observamos una diferencia significativa de la región de procedencia 8 respecto al resto en el MOEdin y tres grupos significativamente diferentes respecto a la densidad básica (Fig 7). Se podrían considerar por tanto 4 grupos homogéneos en cuanto a las propiedades tecnológicas evaluadas: Grupo 1: regiones 5, 6 y 7; Grupo 2: región 8; Grupo 3: región 9; Grupo 4: región 17.

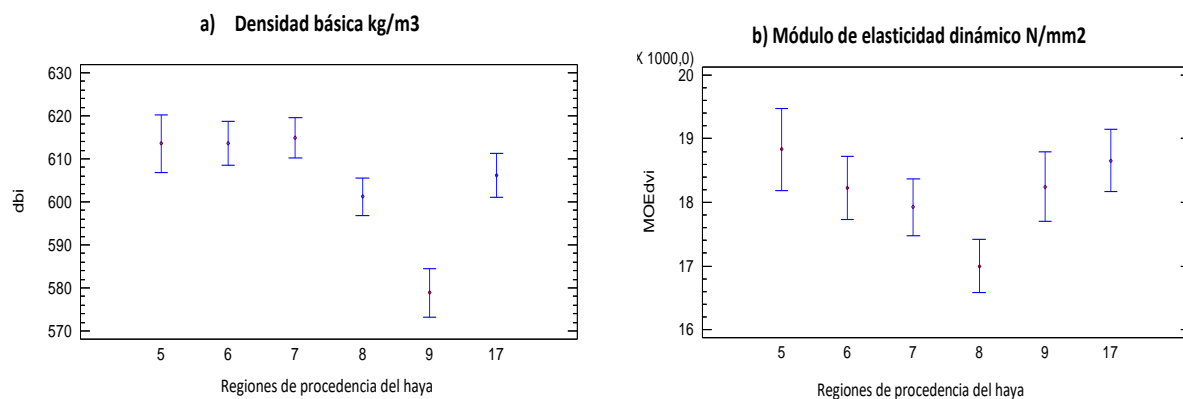


Figura 7: Test de medias de los valores de densidad básica de madera (a) y módulo de elasticidad dinámico (b) respecto a las regiones de procedencia de *Fagus sylvatica*.

A partir de variables fisiográficas y dasométricas de la masa, se han obtenido algunos modelos preliminares de predicción de Módulo de elasticidad dinámico y densidad básica media en las parcelas, con errores medios cuadráticos menores del 10%.

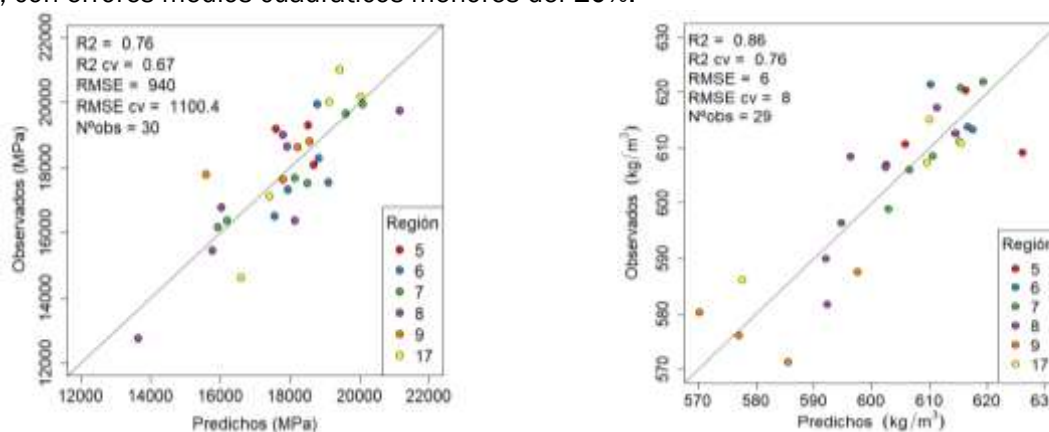


Figura 8. Gráficos de observados/predichos de los modelos de predicción desarrollados para estimar la densidad básica media por parcela y el módulo de elasticidad dinámico medio por parcela.

Se ha observado una variación del Módulo de elasticidad dinámico respecto a las clases de calidad predefinidas de las masas. Así, observamos que las masas con mayor diámetro y altura dominante son significativamente las de mayor módulo de elasticidad. Opuestamente, se aprecian mayores valores de densidad básica en aquellas clases con menores diámetros y menores alturas.

Estos modelos serán validados y optimizados a lo largo del proyecto una vez conocidos los valores reales de módulo de elasticidad y densidad básica sobre las tablas. Los resultados aportarán información relevante que podrá ser considerada en las actuaciones de gestión selvícola para promover la calidad tecnológica de la especie.

### Resistógrafo:

A partir de las mediciones con el resistógrafo 4450S de Rinntech sobre 5 de las parcelas seleccionadas (n=50 árboles) fue obtenido un modelo preliminar de estimación de la densidad a partir de la variable resistencia media del perfil  $R_m$  (%) (Figura 9-a). A partir de las mediciones con el resistógrafo PD500 de IML sobre las 30 las parcelas seleccionadas (n=287 árboles, una vez eliminadas las mediciones erróneas por aparición de nudos) fue obtenido un modelo preliminar de estimación de la densidad de la parte exterior de los troncos de haya a partir de la variable resistencia media del perfil  $R_m$  (%) (Figura 9-b)

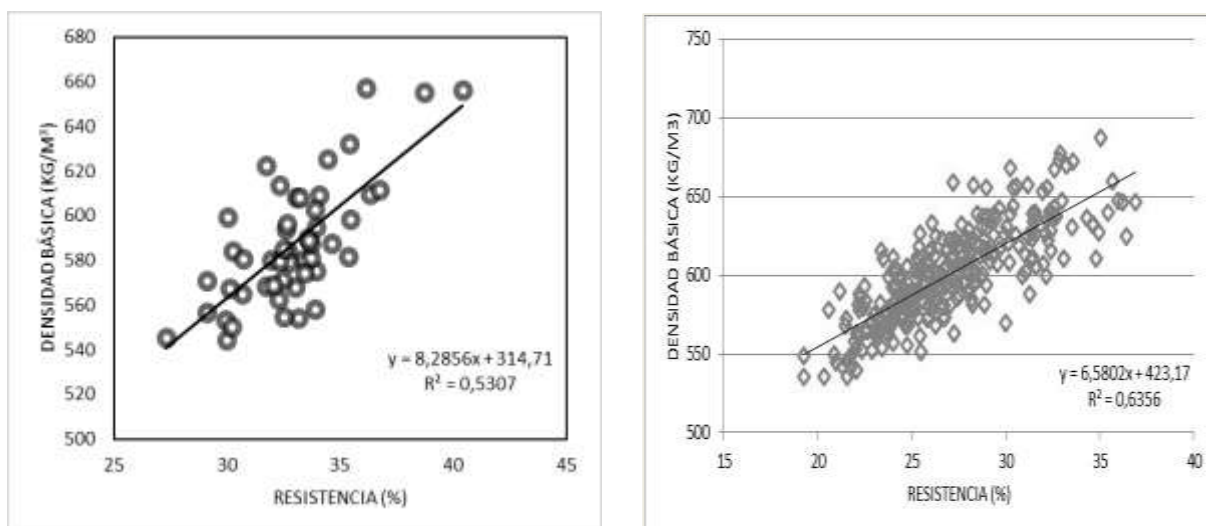


Figura 9. Gráficos de los valores observados frente a predichos de densidad básica en función de la resistencia media del perfil resistográfico con 4450S de Rinntech Regresión lineal sobre 50 árboles ( $R^2=0,53$ ) (a) y del esfuerzo medio de avance del resistógrafo PD500 de IML sobre 300 árboles ( $R^2=0,63$ ).

## 5. Discusión

Se ha conseguido obtener una satisfactoria colección de ecuaciones LiDAR para hayedos puros en el área de interés, con errores medios cuadráticos por debajo del 15% para todas las variables excepto el número de pies por ha. Estas cifras son comparables a los de otros trabajos (FERNÁNDEZ-LANDA et al. 2018; GONZÁLEZ-FERREIRO et al. 2014; GUERRA-HERNÁNDEZ et al. 2016; RODRÍGUEZ-PUERTA et al. 2014) que emplean información LiDAR de baja densidad de puntos, y que han demostrado ser suficientes para obtener predicciones operativas para la gestión. La variable que peores resultados obtiene es el número de árboles por ha, lo cual es un hecho recurrente en este tipo de procesos de modelización con LiDAR aerotransportado de baja densidad. Estos resultados, a su vez, van a permitir en futuras etapas del GO Fagus desarrollar modelos continuos y espacialmente explícitos de otras variables directamente relacionadas con la calidad de la madera, lo cual es uno de los objetivos relevantes del proyecto.

En cuanto a clasificación visual de árboles en pie, es importante disponer de una guía-herramienta sencilla que permita hablar el mismo idioma entre propietarios, gestores, maderistas e industria. Del mismo modo es muy recomendable poder mantener la trazabilidad del monte a la industria en cuanto a calidad tecnológica se refiere.

Las clases de calidad visual D y C son las más comunes en el ámbito de estudio y por tanto en las que más hay que prestar más atención, donde hay más margen, para revalorizar la madera de haya. En este sentido, la posibilidad de integrar en la cadena de suministro, junto con la calidad visual, otras propiedades tecnológicas como el módulo de elasticidad o la densidad, podría optimizar el procesado hacia la obtención de un producto técnico de mayor valor añadido.

Por otro lado, debería tenerse más en cuenta los defectos basales en nuestras masas de haya: a diferencia de otras especies o de otras regiones o países, en las que la premisa es que la troza basal concentra el mayor valor unitario, el estudio hace pensar que en nuestros hayedos no es del todo correcta esta asunción. Este factor debería tenerse más en cuenta a la hora de estimar el volumen maderable en los hayedos españoles.

El módulo dinámico de elasticidad está determinado por la densidad de la madera y el ángulo de la microfibrilla (CABALLÉ et al, 2020), jugando un papel fundamental en la calidad final de



productos con destino estructural, así como en las deformaciones de la madera en el proceso de secado. La posibilidad de estimar esta variable tecnológica a nivel rodal a partir de diferentes variables extraídas de la masa forestal, abre una nueva vía interesante para caracterización a gran escala aplicable en una silvicultura de precisión. Diversos trabajos, en otras especies, ya muestran la posibilidad de predecir dicha propiedad a partir de diversas variables descriptivas de los árboles de la masa relacionados con la silvicultura la edad y la calidad de estación (GALLEGO et al, 2021; MERLO et al., 2014; WATT AND TRINCADO, 2017).

El empleo de resistógrafos como sustitutivo de mediciones de la densidad de la madera en laboratorio ha sido demostrado en varios trabajos (BOUFFIER et al., 2008; GAO et al., 2007). Esta herramienta supone importantes ahorros en tiempo y en costes, minimiza el daño causado al árbol y además permite disponer de una estimación numérica y gráfica de la densidad anual en el mismo momento de la toma de datos en campo.

A pesar de ser sensiblemente más bajos que los frecuentemente indicados en la bibliografía de la temática, los valores de R2 obtenidos en los modelos preliminares mediante el empleo de los resistógrafos Rinntech e IML (0,53 y 0,64 respectivamente) resultan prometedores, y son potencialmente mejorables mediante el incremento de la base de datos, la inclusión de parámetros adicionales o la mejora del procesado de los perfiles en bruto. El proyecto GO FAGUS tendrá como uno de sus resultados la obtención de estos modelos mejorados para la estimación de la densidad en árbol en pie.

Por otra parte, el empleo de láser escáner terrestre (TLS) viene surgiendo en los últimos años como un nuevo dispositivo con un gran potencial para ser implementado en inventarios forestales (MOLINA et al., 2020). Aunque el empleo de este tipo de herramientas es aún reciente y adolece de ciertas limitaciones en cuanto a fragilidad, climatología, alto coste y complejidad de los cálculos en gabinete, el enorme volumen de datos que aportan las nubes de puntos facilita la cuantificación de numerosas variables forestales y permite, por repetición posterior de las tomas de datos, el análisis de su variación temporal de forma objetiva y eficiente. La fotogrametría terrestre o la obtenida por dron también podrían llegar a ser métodos novedosos para obtener esas mismas nubes de puntos a menor coste, pero también con menor precisión en cuanto a dendrometría.

## 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo tienen claras implicaciones para la cadena de valor de la madera de haya. Por un lado los resultados obtenidos en las clasificaciones visuales de trozas que actualmente se llevan a leñas indican calidades intermedias para otro tipo de productos de mayor valor añadido como pueden ser embalajes o tableros. Por otro lado los modelos obtenidos para determinar propiedades mecánicas como la densidad y el módulo de elasticidad indican características muy aptas de la madera para su empleo en productos estructurales como puede ser la madera laminada encolada (MLE), madera contralaminada (CLT) o madera microlaminada (LVL).

Si bien estos resultados pueden suponer grandes implicaciones en la cadena de valor monte industria de los hayedos, se considera necesario validar los resultados obtenidos en este trabajo a través del procesado y obtención de las calidades reales de la madera de estas parcelas. Trabajos que se ejecutaran a lo largo de 2022 y 2023

Este proyecto supone un punto de partida para la inclusión en el mercado de un producto procedente de una especie autóctona, de cercanía y abundante, fomentando el uso de materias primas de origen local y procedentes de explotaciones sostenibles. En definitiva, va a implicar que las empresas dedicadas al sector de la madera puedan apostar por un nuevo producto técnico, ambientalmente responsable.

## 7. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo financiero recibido para la realización de este trabajo al Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación a través del programa de proyectos de Innovación para Grupos Operativos. También los autores quieren agradecer al Gobierno de Navarra, La Diputación Foral de Guipuzcoa, la Diputación Foral de Álava, El Gobierno De La Rioja y La Junta de Castilla y León su apoyo y disposición para la localización, ubicación y medición de parcelas, Servicio forestal y cinegético de Navarra, Guarderío de Medio Ambiente y las empresas de aprovechamientos forestal y serrerías asociadas de ADEMAN que han aportado su conocimiento, recursos y tiempo.

El grupo operativo “Fagus” ha recibido para su proyecto de innovación una subvención de 565.377,12 €. El importe del proyecto es cofinanciado al 80% por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) “Europa invierte en las zonas rurales” y al 20% por fondos de la Administración General del Estado (AGE). La Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Política Forestal (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) es la autoridad de gestión encargada de la aplicación de la ayuda del FEADER y nacional correspondiente. Más información: [https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries\\_es](https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries_es). Comisión Europea: Área de Agricultura y Desarrollo Rural. Programa Nacional de Desarrollo Rural: PNDR

## 8. Bibliografía

ALONSO PONCE, R.; LIZARRALDE, I.; RODRÍGUEZ-PUERTA, F. Y PÉREZ-RODRÍGUEZ, F., 2018. EasyLaz 1.0. Registro de la Propiedad Intelectual SO-8/2018.

BOUFFIER, L., CHARLOT, C., RAFFIN, A., ROZENBERG, P., & KREMER, A.; 2008. Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)?. *Annals of Forest Science* 65 (2008) 106. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2007078>.

BRUNETTI, M., NOCETTI, M., PIZZO, B., AMINTI, G., CREMONINI, C., NEGRO, F., ZANUTTINI, R., ROMAGNOLI, M., SCARASCIA MUGNOZZA, G.; 2020. Structural products made of beech wood: quality assessment of the raw material. *European Journal of Wood and Wood Products*. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01542-9>.

CABALLÉ G.,\* , SANTA CLARA O., DIEZA J.P, LETOURNEAU F., MERLO E., MARTINEZ MEIER A.; 2020. Where to find structural grade timber: A case study in ponderosa pine based on stand and tree level factors. *Forest Ecology and Management*. Volume 459, 1 March, 117849

EHRHART, T., STEIGER, R., LEHMANN, M., FRANGI, A.; 2020 European beech (*Fagus sylvatica* L.) glued laminated timber: lamination strength grading, production and mechanical properties. *European Journal of Wood and Wood Products* (2020) 78:971–984 <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01545-6>

FERNÁNDEZ-LANDA, A.; FERNÁNDEZ-MOYA, J.; TOMÉ, J.L.; ALGEET-ABARQUERO, N.; GUILLÉN-CLIMENT, M.L.; VALLEJO, R.; SANDOVAL, V. Y MARCHAMALO, M., 2018. High resolution forest inventory of pure and mixed stands at regional level combining National Forest Inventory field plots, Landsat, and low density lidar. *Int. J. Remote Sens.* 39, 4830-4844.

GALLEGO, A., RIPOLL, M.A., TIMBOLMAS, C., RESCALVO, F., SUAREZ, E., VALVERDE, I., RODRÍGUEZ, M., NAVARRO, F. B., MERLO, E.; 2021. Modulus of elasticity of 1214 young poplar wood from standing trees to sawn timber: influence of the age and stand density. *European Journal of Wood and Wood Products* (2021) 79:1225–1239. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01675-5>.

GAO, S., WANG, X., WIEMANN, M.C. et al.; 2017. A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. *Annals of Forest Science* 74, 27. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0623-4>.

GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; CRECENTE-CAMPO, F.; BARREIRO-FERNÁNDEZ, L.; MIRANDA, D. Y CASTEDO-DORADO, F., 2014. Modelling canopy fuel variables for *Pinus radiata* D. Don in NW Spain with low-density LiDAR data. *Int. J. Wildl. fire* 23, 350-362.

MERLO E, ÁLVAREZ-GONZÁLEZ JG, SANTA CLARA O, RIESCO G.; 2014. Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. *Forest Syst* 23(1):153–166. <https://doi.org/10.5424/fs/2014231-04706>.

MCGAUGHEY, R.J., 2021. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. V4.20. USDA. 212 pp. Seattle, WA.

MOLINA VALERO, J. A., GINZO VILLAMAYOR, M. J., NOVO PÉREZ, M. A., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G. ., & PÉREZ-CRUZADO, C.; 2020. Estimación del área basimétrica en masas maduras de *Pinus sylvestris* en base a una única medición del escáner láser terrestre (TLS). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 45(3), 97-116. <https://doi.org/10.31167/csecfv0i45.19887>.

RODRÍGUEZ-PUERTA, F.; FERNÁNDEZ-LANDA, A. Y TOMÉ, J.L., 2014. Resultados y reflexiones tras cinco años de inventario forestal con tecnología LiDAR. *Foresta* 61 28-33.

WATT, M.S., TRINCADO, G., 2017. Modelling the influence of environment on juvenile modulus of elasticity in *Pinus radiata* grown in Chile. *For. Ecol. Manage.* 400, 238–245.