

MEJORA DE LA CONTRIBUCIÓN DEL SECTOR FORESTAL A LA LUCHA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMACIÓN *EX POST*
DEL CARBONO (C) FIJADO EN PROYECTOS DE
ABSORCIÓN POR REPOBLACIÓN FORESTAL

DICIEMBRE DE 2025



El proyecto eco2for cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demo gráfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Este material ha sido desarrollado por:



ICIFOR–INIA, CSIC

Cómo citar:

Pardos, M., Menéndez–Miguélez, M., Ruiz–Peinado, R., López–Senespleda, E., del Río, M., Madrigal, G., Ramos, R., Núñez Manso, Y., González, D., y Calama, R. 2025. Ecuaciones alométricas para estimación *ex post* del carbono (C) fijado en proyectos de absorción por repoblación forestal. Informe inédito. Versión 1. ICIFOR, INIA–CSIC. © 2025 by RAFAEL CALAMA SAINZ et al. is licensed under CC BY-NC-ND 4.0. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ÍNDICE

1. Objetivos y motivación.....	4
2. Ecuaciones para estimación <i>ex post</i>	4
2.1. Metodología basada en el uso de ecuaciones de biomasa individual.....	4
2.2. Metodología basada en el uso de curvas de calidad estación y modelos de biomasa por hectárea.....	13
3. Métodos de muestreo para seguimiento en repoblaciones	17
3.1. Inventarios en campo	17
3.2. Muestreos mediante sensor remoto	19
4. Bibliografía.....	20
ANEXO (A1). Estimaciones de biomasa subterránea y transformación a C fijado	22
ANEXO (A2). Relaciones diámetro normal – diámetro de cuello de raíz para repoblaciones forestales	23

INFORMACIÓN DEL DOCUMENTO

PROYECTO BF138 – CONVOCATORIA BIOECONOMÍA FORESTAL 2023	
Título del proyecto	Mejora de la contribución del sector forestal a la lucha contra el cambio climático
Acrónimo del proyecto	eco2for
Título acción	A3 Mejora de las herramientas de cálculo de proyectos de forestación
Título subacción	A.3.1. Creación de nueva calculadora de cálculo de ámbito nacional para proyectos de forestación.
Duración	M2–M19
Código resultado	R 3.2
Nombre del entregable	Nueva calculadora para proyectos de forestación. Colección de modelos para la estimación <i>ex post</i> .
Entidad coordinadora de la acción	INIA
Entidad coordinadora de la subacción	INIA

1. Objetivos y motivación

Las repoblaciones forestales y nuevas plantaciones constituyen uno de los reservorios de biomasa y carbono (C) atmosférico. El C total contenido en uno de estos nuevos bosques debe ser estimado de manera precisa y eficiente, al objeto de ser considerados en distintos programas nacionales e internacionales, como pueden ser los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero, los programas de uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (LULUCF) o los proyectos de compensación de Huella de Carbono. En todos los casos se requiere realizar estimaciones *ex ante* (anteriores a la instalación del proyecto de repoblación forestal) y *ex post* (una vez instalado el proyecto y transcurridos una serie de años desde su implantación).

El objetivo del presente informe es proporcionar herramientas para la estimación *ex post* de la biomasa y C contenido en un proyecto de repoblación. El informe se divide en dos partes principales:

- Presentación de ecuaciones de árbol individual y de parcela para la estimación *ex post* de la biomasa contenida a partir de mediciones de inventario en campo o sensor remoto.
- Metodologías de muestreo en repoblaciones, tanto para la ejecución de inventarios en campo como para la realización de muestreos mediante técnicas de sensor remoto.

El informe se complementa con anexos que incluyen ecuaciones complementarias o auxiliares y valores tabulados de ratios de biomasa subterránea – biomasa aérea.

2. Ecuaciones para estimación *ex post*

2.1. Metodología basada en el uso de ecuaciones de biomasa individual

Esta metodología se basa en el uso de ecuaciones alométricas de biomasa individual, que permiten estimar la biomasa aérea de un individuo a partir de variables medidas directamente sobre el árbol (en inventario de campo o inventario por sensor remoto), como son el diámetro en cuello de raíz, diámetro normal, altura, diámetro de copa y variables derivadas de éstas.

Especies nativas utilizadas en repoblaciones

Los modelos no lineales de biomasa de árbol individual desarrollados por Menéndez et al. (2022, 2023) y Calama et al. (2022, 2024) permiten la cuantificación de la biomasa aérea y el cálculo de los stocks de carbono para las 15 especies nativas principales empleadas en las repoblaciones forestales en España (*Betula sp.*, *Castanea sativa*, *Fagus sylvatica*, *Juniperus thurifera*, *Olea europaea*, *Pinus halepensis*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea*, *Pinus sylvestris*, *Quercus faginea*, *Quercus ilex*, *Quercus pyrenaica*, *Quercus robur+petraea* y *Quercus suber*). Dichos modelos son de tipo potencial:

$$b_{aerea} = \beta_0 \cdot (X)^{\beta_1}$$

, donde b_{aerea} es la biomasa aérea, β_0 y β_1 son parámetros a modelizar y X representa la variable predictora.

Los modelos se ajustan a partir de tres variables independientes (diámetro en el cuello de la raíz, altura y área de proyección de la copa), frecuentemente medidas en los inventarios que se realizan en las repoblaciones. Se emplea el diámetro del cuello de la raíz en lugar del diámetro normal, ya que se puede alargar el tiempo (años) hasta que las plantas alcancen 1,30 m de altura.

Así, se pueden utilizar tres modelos (Modelo 1, Modelo 2, Modelo 3) a partir de cada variable individual, u otros dos modelos (Modelo 4 y Modelo 5), por combinación de las variables anteriores:

$$b_{aerea} = \beta_0 \cdot (d)^{\beta_1} \quad \text{Modelo 1}$$

$$b_{aerea} = \beta_2 \cdot (h)^{\beta_3} \quad \text{Modelo 2}$$

$$b_{aerea} = \beta_4 \cdot (s_copa)^{\beta_5} \quad \text{Modelo 3}$$

$$b_{aerea} = \beta_6 \cdot (d^2 h)^{\beta_7} \quad \text{Modelo 4}$$

$$b_{aerea} = \beta_8 \cdot (BP)^{\beta_9} \quad \text{Modelo 5}$$

, donde b_{aerea} es la biomasa aérea seca (Kg), d es el diámetro del cuello de la raíz (cm), h es la altura total del árbol (m), S_copa es la proyección de la copa (m^2), BP (m^3) es el biovolumen o biomass packing ($BP = s_copa \cdot h$) y β_i son los parámetros de cada modelo.

Los valores predichos de los parámetros y los estadísticos de bondad de ajuste obtenidos para cada uno de los modelos probados se muestran de las Tabla 1.1 a 1.5: (1) Modelo 1: dependientes de diámetro de cuello de la raíz, (2) Modelo 2: altura total, (3) Modelo 3: s_copa , (4) Modelo 4: $d^2 \cdot h$ (donde d es el diámetro en cuello de raíz) y (5) Modelo 5: BP.

Tabla 1.1. Estimación de los parámetros, errores estándar asociados y estadísticos de bondad de ajuste para la biomasa aérea estimada con la ecuación dependiente de d_cuello raíz (Modelo 1), para las 16 especies.

MODELO	ESPECIE	β_i	ESTIMA CIÓN	ERROR ESTÁNDAR	$Pr> t $	REMC	R^2_{adj}
MODELO 1 $b_{aerea} = \beta_0 \cdot (d)^{\beta_1}$ (Modelo dependiente del Diámetro del cuello de la raíz)	<i>Betula sp.</i>	β_0	0,0279	0,0107	0,0136	1,9442	0,7027
		β_1	2,4641	0,1861	<0,0001		
	<i>Castanea sativa</i>	β_0	0,7274	0,5051	0,1691	24,6513	0,8378
		β_1	1,5641	0,2094	<0,0001		
	<i>Fagus sylvatica</i>	β_0	0,1569	0,0503	0,0059	4,2634	0,9560
		β_1	2,1178	0,1203	<0,0001		
	<i>Juniperus thurifera</i>	β_0	0,0396	0,0079	<0,0001	1,1205	0,8886
		β_1	2,3707	0,1011	<0,0001		
	<i>Olea europaea</i>	β_0	3,6317	2,9215	0,2249	27,8893	0,1964
		β_1	0,8498	0,3165	0,0125		
	<i>Pinus halepensis</i>	β_0	0,1123	0,0201	<0,0001	9,0219	0,8048
		β_1	1,9872	0,0753	<0,0001		
	<i>Pinus nigra</i>	β_0	0,0179	0,0037	<0,0001	11,1603	0,7659
		β_1	2,7027	0,0897	<0,0001		
	<i>Pinus pinaster</i>	β_0	0,0195	0,0030	<0,0001	12,0279	0,8437
		β_1	2,5533	0,0644	<0,0001		
	<i>Pinus pinea</i>	β_0	0,5952	0,1863	0,0017	20,5209	0,5845
		β_1	1,5833	0,1652	<0,0001		
	<i>Pinus radiata</i>	β_0	0,0553	0,0132	0,0001	11,8794	0,8973
		β_1	2,4024	0,0893	<0,0001		
	<i>Pinus sylvestris</i>	β_0	0,0157	0,0024	<0,0001	3,0345	0,9348
		β_1	2,6911	0,0619	<0,0001		
	<i>Quercus faginea</i>	β_0	0,1410	0,0189	<0,0001	5,1008	0,7897
		β_1	1,8618	0,0710	<0,0001		
	<i>Quercus ilex</i>	β_0	0,0306	0,0037	<0,0001	10,3613	0,7794
		β_1	2,6580	0,0508	<0,0001		
	<i>Quercus pyrenaica</i>	β_0	0,0294	0,0038	<0,0001	0,3476	0,9681
		β_1	2,3870	0,0652	<0,0001		
	<i>Quercus robur+petraea</i>	β_0	0,0202	0,0043	<0,0001	5,6668	0,8785
		β_1	2,6326	0,0895	<0,0001		
	<i>Quercus suber</i>	β_0	0,0287	0,0073	0,0001	14,9719	0,7929
		β_1	2,4290	0,0906	<0,0001		

Tabla 1.2. Estimación de los parámetros, errores estándar asociados y estadísticos de bondad de ajuste para la biomasa aérea estimada con la ecuación dependiente de altura total [Modelo 2], para las 16 especies.

MODELO	ESPECIE	β_i	ESTIMA CIÓN	ERROR ESTÁNDAR	$Pr> t $	REMC	R^2_{adj}
MODELO 2 $b_{aerea} = \beta_2 \cdot (h)^{\beta_3}$ (Modelo dependiente de la altura)	<i>Betula sp.</i>	β_2	0,0243	0,0095	0,0151	1,4473	0,8353
		β_3	3,6478	0,2942	<0,0001		
	<i>Castanea sativa</i>	β_2	5,6421	8,6986	0,5258	61,5676	–
		β_3	1,3128	0,8120	0,1254		
	<i>Fagus sylvatica</i>	β_2	0,1781	0,0320	<0,0001	13,7530	0,5424
		β_3	2,4063	0,1127	<0,0001		
	<i>Juniperus thurifera</i>	β_2	0,6770	0,1601	0,0002	1,5391	0,7899
		β_3	2,1300	0,2393	<0,0001		
	<i>Olea europaea</i>	β_2	4,9314	1,5797	0,0044	19,1745	0,6202
		β_3	2,5070	0,3352	<0,0001		
	<i>Pinus halepensis</i>	β_2	1,4980	0,1648	<0,0001	9,4329	0,7866
		β_3	1,9392	0,0844	<0,0001		
	<i>Pinus nigra</i>	β_2	1,1483	0,1022	<0,0001	11,7826	0,7390
		β_3	1,8678	0,0580	<0,0001		
	<i>Pinus pinaster</i>	β_2	0,8941	0,1482	<0,0001	16,2459	0,7149
		β_3	1,9505	0,0869	<0,0001		
	<i>Pinus pinea</i>	β_2	1,0409	0,0678	<0,0001	13,1987	0,8281
		β_3	2,4952	0,0502	<0,0001		
	<i>Pinus radiata</i>	β_2	0,7348	0,2142	0,0013	11,6527	0,9012
		β_3	1,8421	0,1192	<0,0001		
	<i>Pinus sylvestris</i>	β_2	0,9658	0,1568	<0,0001	6,1200	0,7350
		β_3	1,7344	0,0925	<0,0001		
	<i>Quercus faginea</i>	β_2	0,7629	0,1530	<0,0001	7,4433	0,5523
		β_3	2,1255	0,1902	<0,0001		
	<i>Quercus ilex</i>	β_2	0,6520	0,0486	<0,0001	13,1252	0,6460
		β_3	2,8257	0,0675	<0,0001		
	<i>Quercus pyrenaica</i>	β_2	0,1706	0,0254	<0,0001	0,3778	0,9623
		β_3	2,9274	0,1265	<0,0001		
	<i>Quercus robur+petraea</i>	β_2	0,1443	0,0413	0,0013	7,4846	0,7881
		β_3	2,4547	0,1870	<0,0001		
	<i>Quercus suber</i>	β_2	0,6772	0,1539	<0,0001	20,6097	0,6075
		β_3	2,4387	0,1595	<0,0001		

Tabla 1.3. Estimación de los parámetros, errores estándar asociados y estadísticos de bondad de ajuste para la biomasa aérea estimada con la ecuación dependiente de s_copa [Modelo 3], para las 16 especies.

MODELO	ESPECIE	β_i	ESTIMA CIÓN	ERROR ESTÁNDAR	$Pr> t $	REMC	R^2_{adj}
MODELO 3 $b_{aerea} = \beta_4 \cdot (s_copa)^{\beta_5}$ (Modelo dependiente de la proyección de la copa)	<i>Betula sp.</i>	β_4	0,0920	0,0655	0,1686	3,0817	0,2531
		β_5	1,3163	0,2596	<0,0001		
	<i>Castanea sativa</i>	β_4	1,7868	1,1917	0,1532	25,2092	0,8303
		β_5	0,8960	0,1401	<0,0001		
	<i>Fagus sylvatica</i>	β_4	0,3056	0,1590	0,0705	9,3306	0,7894
		β_5	1,2369	0,1353	<0,0001		
	<i>Juniperus thurifera</i>	β_4	0,2205	0,1186	0,0805	1,9517	0,7787
		β_5	1,2837	0,2192	<0,0001		
	<i>Olea europaea</i>	β_4	1,7287	0,9388	0,0770	23,1825	0,4448
		β_5	0,8740	0,1530	<0,0001		
	<i>Pinus halepensis</i>	β_4	–	–	–	–	–
		β_5	–	–	–		
	<i>Pinus nigra</i>	β_4	0,4402	0,0722	<0,0001	10,9552	0,7744
		β_5	1,3140	0,0535	<0,0001		
	<i>Pinus pinaster</i>	β_4	4,2013	0,8163	<0,0001	20,2152	0,5812
		β_5	1,2009	0,0968	<0,0001		
	<i>Pinus pinea</i>	β_4	0,3690	0,0501	<0,0001	3,1566	0,9776
		β_5	1,3118	0,0475	<0,0001		
	<i>Pinus radiata</i>	β_4	1,1653	0,5006	0,0244	26,2079	0,5002
		β_5	0,9611	0,1179	<0,0001		
	<i>Pinus sylvestris</i>	β_4	0,8255	0,1503	<0,0001	5,8949	0,7542
		β_5	1,0009	0,0545	<0,0001		
	<i>Quercus faginea</i>	β_4	0,4227	0,0253	<0,0001	5,8950	0,7192
		β_5	1,0954	0,0391	<0,0001		
	<i>Quercus ilex</i>	β_4	0,2312	0,0293	<0,0001	6,5127	0,9187
		β_5	1,4730	0,0487	<0,0001		
	<i>Quercus pyrenaica</i>	β_4	0,1704	0,0233	<0,0001	0,7434	0,8541
		β_5	1,3382	0,0597	<0,0001		
	<i>Quercus robur+petraea</i>	β_4	0,2610	0,0373	<0,0001	13,8730	0,2721
		β_5	1,2538	0,0689	<0,0001		
	<i>Quercus suber</i>	β_4	1,3192	0,4839	0,0091	21,2278	0,8210
		β_5	1,0235	0,0886	<0,0001		

Tabla 1.4. Estimación de los parámetros, errores estándar asociados y estadísticos de bondad de ajuste para la biomasa aérea estimada con la ecuación dependiente de d^2h [Modelo 4], para las 16 especies.

MODELO	ESPECIE	β_i	ESTIMA CIÓN	ERROR ESTÁNDAR	$Pr> t $	REMC	R^2_{adj}
MODELO 4 $b_{aerea} = \beta_6 \cdot (d^2h)^{\beta_7}$ (Modelo dependiente de d^2h)	<i>Betula sp.</i>	β_6	0,0250	0,0071	0,0013	1,6737	0,7797
		β_7	0,9502	0,0525	<0,0001		
	<i>Castanea sativa</i>	β_6	0,0275	0,0172	0,1292	16,2164	0,9298
		β_7	0,9756	0,0734	<0,0001		
	<i>Fagus sylvatica</i>	β_6	0,0574	0,0221	0,0181	3,4970	0,9704
		β_7	0,8930	0,0521	<0,0001		
	<i>Juniperus thurifera</i>	β_6	0,1017	0,0187	<0,0001	0,7938	0,9441
		β_7	0,8069	0,0381	<0,0001		
	<i>Olea europaea</i>	β_6	2,4330	1,8411	0,1979	15,3577	0,7563
		β_7	0,4500	0,1266	0,0015		
	<i>Pinus halepensis</i>	β_6	0,3061	0,0399	<0,0001	7,5973	0,8616
		β_7	0,6536	0,0227	<0,0001		
	<i>Pinus nigra</i>	β_6	0,0987	0,0113	<0,0001	10,5774	0,7897
		β_7	0,8121	0,0224	<0,0001		
	<i>Pinus pinaster</i>	β_6	0,0843	0,0077	<0,0001	10,3618	0,8840
		β_7	0,8021	0,0146	<0,0001		
	<i>Pinus pinea</i>	β_6	0,1417	0,0111	<0,0001	7,9859	0,9371
		β_7	0,7757	0,0121	<0,0001		
	<i>Pinus radiata</i>	β_6	0,1355	0,0363	0,0005	11,2584	0,9079
		β_7	0,7473	0,0342	<0,0001		
	<i>Pinus sylvestris</i>	β_6	0,0913	0,0101	<0,0001	3,6985	0,9032
		β_7	0,7857	0,0185	<0,0001		
	<i>Quercus faginea</i>	β_6	0,2046	0,0368	<0,0001	4,0640	0,8665
		β_7	0,7076	0,0332	<0,0001		
	<i>Quercus ilex</i>	β_6	0,0953	0,0085	<0,0001	10,2007	0,7862
		β_7	0,9023	0,0159	<0,0001		
	<i>Quercus pyrenaica</i>	β_6	0,0614	0,0044	<0,0001	0,1970	0,9897
		β_7	0,8182	0,0142	<0,0001		
	<i>Quercus robur+petraea</i>	β_6	0,0541	0,0094	<0,0001	6,2047	0,8544
		β_7	0,8361	0,0287	<0,0001		
	<i>Quercus suber</i>	β_6	0,0300	0,0100	0,0034	12,8420	0,8476
		β_7	0,9648	0,0434	<0,0001		

Tabla 1.5. Estimación de los parámetros, errores estándar asociados y estadísticos de bondad de ajuste para la biomasa aérea estimada con la ecuación dependiente de BP [Modelo 5]), para las 16 especies.

MODELO	ESPECIE	β_i	ESTIMA CIÓN	ERROR ESTÁNDAR	$Pr> t $	REMC	R^2_{adj}
MODELO 5 $b_{aerea} = \beta_8 \cdot (BP)^{\beta_9}$ (Modelo dependiente de BP)	<i>Betula sp.</i>	β_8	0,0258	0,0090	0,0072	2,4600	0,5241
		β_9	1,2203	0,0928	<0,0001		
	<i>Castanea sativa</i>	β_8	0,2150	0,1403	0,1449	26,0911	0,8183
		β_9	0,9492	0,0989	<0,0001		
	<i>Fagus sylvatica</i>	β_8	0,2348	0,0885	0,0162	8,7283	0,8157
		β_9	0,8453	0,0654	<0,0001		
	<i>Juniperus thurifera</i>	β_8	0,2915	0,1038	0,0121	1,4414	0,8793
		β_9	0,8776	0,1077	<0,0001		
	<i>Olea europaea</i>	β_8	1,4749	0,6826	0,0401	19,1745	0,6202
		β_9	0,7678	0,1068	<0,0001		
	<i>Pinus halepensis</i>	β_8	0,4970	0,0779	<0,0001	8,0396	0,8817
		β_9	0,8554	0,0479	<0,0001		
	<i>Pinus nigra</i>	β_8	0,6275	0,0608	<0,0001	6,8698	0,9113
		β_9	0,8113	0,0235	<0,0001		
	<i>Pinus pinaster</i>	β_8	1,5599	0,1905	<0,0001	13,8546	0,8033
		β_9	0,8829	0,0339	<0,0001		
	<i>Pinus pinea</i>	β_8	6,1249	1,1380	<0,0001	18,1395	0,2618
		β_9	0,3593	0,0796	<0,0001		
	<i>Pinus radiata</i>	β_8	0,5221	0,1871	0,0076	15,6322	0,8222
		β_9	0,7902	0,0618	<0,0001		
	<i>Pinus sylvestris</i>	β_8	0,6739	0,0965	<0,0001	4,8991	0,8302
		β_9	0,7113	0,0287	<0,0001		
	<i>Quercus faginea</i>	β_8	0,6570	0,0564	<0,0001	5,1971	0,7817
		β_9	0,7149	0,0306	<0,0001		
	<i>Quercus ilex</i>	β_8	0,4027	0,0353	<0,0001	9,9862	0,9064
		β_9	0,9719	0,0247	<0,0001		
	<i>Quercus pyrenaica</i>	β_8	0,1976	0,0196	<0,0001	0,5793	0,9114
		β_9	0,8957	0,0297	<0,0001		
	<i>Quercus robur+petraea</i>	β_8	0,1808	0,0425	0,0001	9,6584	0,6472
		β_9	0,9351	0,0589	<0,0001		
	<i>Quercus suber</i>	β_8	–	–	–	–	–
		β_9	–	–	–		

Nota. β_i es el parámetro estimado; REMC es la raíz del error medio cuadrático; R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado.

En general y para todas las especies, el modelo que muestra un mejor ajuste es el Modelo 4, donde se utiliza el producto del cuadrado del diámetro del cuello de la raíz y la altura de la planta como predictora ($d^2 \cdot h$), variables comúnmente medidas en inventarios de campo. Sin embargo, los modelos que sólo utilizan la altura (Modelo 2), la sección de copa (Modelo 3), o el producto de ambas (Modelo 5) pueden tener interés para su aplicación en el caso de inventarios realizados a partir de ortofoto o vuelos LIDAR.

Ecuaciones con validez para grupos de especies

Para aquellas especies de las que no se dispone de ecuación específica, se han ajustado modelos generales por grupo de especie (coníferas, frondosas caducifolias y frondosas perennifolias), con estructura similar a la presentada en el apartado anterior. Los modelos han sido ajustados juntando los datos procedentes de pies muestreados pertenecientes a las especies de cada grupo (incluidos pies de especies muy poco representadas, que no permitían el ajuste individual). Los modelos pueden ser utilizados tanto en el caso de que no se conozca la especie, y solo se conozca el grupo, como en el caso más habitual de aplicar el modelo a especies que no disponen de una ecuación propia. Los grupos son:

- Coníferas: aplicable para especies no incluidas como *Pinus uncinata*, *Pinus canariensis*, *Abies sp.*
- Frondosas perennifolias: aplicable a *Ceratonia siliqua*, *Quercus pubescens*, *Quercus coccifera*.
- Frondosas caducifolias: *Celtis australis*, *Juglans sp.*, *Fraxinus sp.*

En la Tabla 2 se muestrean los parámetros de ajustes de los modelos 1 – 5 a los distintos grupos de especies definidos.

Tabla 2. Estimación de los parámetros, errores estándar asociados y estadísticos de bondad de ajuste para la biomasa aérea estimada con modelos 1–5, para los tres grupos de especies definidos.

MODELO	GRUPO	β_i	ESTIMA- CIÓN	ERROR ESTÁNDAR	$Pr > t $	REMC	R^2_{adj}
MODELO 1 $b_{aerea} = \beta_0 \cdot (d)^{\beta_1}$ (Modelo dependiente del Diámetro del cuello de la raíz)	Coníferas	β_0	0,0343	0,0024	<0,0001	9,4780	0,8635
		β_1	2,4141	0,0282	<0,0001		
	Frondosas perennifolias	β_0	0,0641	0,0129	<0,0001	16,0249	0,5944
		β_1	2,1361	0,0793	<0,0001		
	Frondosas caducifolias	β_0	0,0185	0,0042	<0,0001	8,1886	0,7978
		β_1	2,7322	0,0881	<0,0001		
MODELO 2 $b_{aerea} = \beta_2 \cdot (h)^{\beta_3}$ (Modelo dependiente de la altura)	Coníferas	β_2	1,9235	0,1385	<0,0001	16,7475	0,5746
		β_3	1,6446	0,0400	<0,0001		
	Frondosas perennifolias	β_2	0,7607	0,0684	<0,0001	18,5573	0,4561
		β_3	2,7010	0,0839	<0,0001		
	Frondosas caducifolias	β_2	0,0754	0,0153	<0,0001	10,0174	0,6973
		β_3	2,8930	0,1268	<0,0001		
MODELO 3 $b_{aerea} = \beta_4 \cdot (s_{copa})^{\beta_5}$ (Modelo dependiente de la proyección de la copa)	Coníferas	β_4	0,2932	0,0234	<0,0001	14,5926	0,7279
		β_5	1,3532	0,0270	<0,0001		
	Frondosas perennifolias	β_4	2,4565	0,4296	<0,0001	23,8478	0,2666
		β_5	0,8555	0,0686	<0,0001		
	Frondosas caducifolias	β_4	0,1583	0,0882	0,0757	15,6320	0,2630
		β_5	1,3960	0,1579	<0,0001		
MODELO 4 $b_{aerea} = \beta_6 \cdot (d^2 h)^{\beta_7}$ (Modelo dependiente de $d^2 \cdot h$)	Coníferas	β_6	0,1381	0,0076	<0,0001	10,1546	0,8436
		β_7	0,7658	0,0085	<0,0001		
	Frondosas perennifolias	β_6	0,1194	0,0145	<0,0001	14,5419	0,6660
		β_7	0,8341	0,0217	<0,0001		
	Frondosas caducifolias	β_6	0,0318	0,0037	<0,0001	5,5141	0,9083
		β_7	0,9401	0,0187	<0,0001		
MODELO 5 $b_{aerea} = \beta_8 \cdot (BP)^{\beta_9}$ (Modelo dependiente de BP)	Coníferas	β_8	0,5231	0,0300	<0,0001	10,5867	0,8568
		β_9	0,8370	0,0130	<0,0001		
	Frondosas perennifolias	β_8	1,5913	0,2470	<0,0001	20,6508	0,4500
		β_9	0,7341	0,0435	<0,0001		
	Frondosas caducifolias	β_8	0,1679	0,0680	0,0152	13,7981	0,4258
		β_9	0,9221	0,0757	<0,0001		

Ecuaciones para especies exóticas utilizadas en plantaciones productivas

Dentro de esta categoría se incluyen todas aquellas especies utilizadas en plantaciones productivas, y cuya principal característica es que no son nativas en España, por lo que todas las formaciones que se localizan en nuestro país son de origen artificial. Presentamos en este apartado ecuaciones de biomasa individual para las siguientes especies (Menéndez–Miguélez et al. 2021):

- *Pinus radiata*.
- *Eucalyptus globulus*.
- *Eucalyptus nitens*.
- *Populus hyb*.
- *Sequoia sempervirens*.
- *Larix sp*.
- *Pseudotsuga menziesii*.
- *Cryptomeria japonica*.

La principal particularidad es que dada la rapidez de crecimiento de estas especies, los modelos construidos utilizan como variable predictora el diámetro normal dn , en vez del diámetro en el cuello de raíz d . En el caso de encontrar individuos con altura h inferior a 1,30 m, se recomienda usar la ecuación que depende únicamente de la altura (salvo en *P. radiata*, que permite incluir un valor de $dn=0$).

Para *P. radiata*, *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*. y *Sequoia sempervirens* se han construido ecuaciones específicas del tipo (Calama et al., 2022, González–Gaarslev et al., 2025):

$$b_{aerea} = \beta_0 \cdot (dn)^{\beta_1} \quad \text{Modelo 6}$$

$$b_{aerea} = \beta_2 \cdot (h)^{\beta_3} \quad \text{Modelo 7}$$

$$b_{aerea} = \beta_6 \cdot (dn^2 h)^{\beta_7} \quad \text{Modelo 8}$$

Tabla 3. Estimación de los parámetros, errores estándar asociados y estadísticos de bondad de ajuste para la biomasa aérea estimada con los modelos 6–7, para *Eucalyptus sp.*, *Sequoia sempervirens* y *Pinus radiata*.

Especie	Ec.	Variable	Parm.	Estimación	Error estándar	REMC	R^2_{adj}
<i>E. globulus</i>	6	dn	β_0	0,2158	0,0464	63,9989	0,9745
			β_1	2,2438	0,0580		
	7	h	β_0	0,0272	0,0323 ^{ns}	339,1332	0,2858
			β_1	3,2283	0,3996		
	8	dn2h	β_0	0,0772	0,0118	54,3514	0,9816
			β_1	0,8981	0,0153		
<i>E. nitens</i>	6	dn	β_0	0,0201	0,0893*	13,7397	0,9705
			β_1	3,1036	0,1533		
	7	h	β_0	0,0089	0,0054 ^{ns}	14,6899	0,9662
			β_1	3,0813	0,1894		
	8	dn2h	β_0	0,0089	0,0206**	5,6733	0,9950
			β_1	1,0949	0,0251*		
<i>Sequoia s.</i>	6	dn	β_0	0,1671	0,0581**	10,4938	0,9294
			β_1	1,9806	0,1154		
	7	h	β_0	0,0717	0,0426 ^{ns}	16,0172	0,8354
			β_1	2,8420	0,2642		
	8	dn ² h	β_0	0,0473	0,0189*	6,4261	0,9735
			β_1	0,8657	0,0465		
<i>Pinus radiata</i>	7	h	β_0	0,1576	0,0316	231,5173	0,7772
			β_1	2,5585	0,0703		
	8**	[dn+1] ² h	β_0	0,0851	0,0132	56,5955	0,9867
			β_1	0,8462	0,0148		



Para *Populus hyb.* se recomienda utilizar la ecuación propuesta por Menéndez–Miguélez et al. (2021), dependiente del diámetro normal y la altura total (con REMC = 63.00 y $R^2_{adj} = 0.9721$):

$$b_{aerea} = \frac{0,0289 \cdot (dn^2 h)^{0,9313}}{1 - 0,8969 (dn^2 h)^{-0,1283}}$$

Para *Larix sp.*, *Pseudotsuga menziesii* y *Cryptomeria japonica* se han utilizado datos de muestreos destructivos realizados en plantaciones de estas especies en el País Vasco al objeto de evaluar distintos modelos alométricos de biomasa dependientes del diámetro normal y la altura total preexistentes en la literatura (González–Gaarslev et al., 2025), siendo los seleccionados los siguientes:

- *Pseudotsuga menziesii*. Se han comparado distintos modelos publicados en la literatura con los datos de 23 pies muestreados en plantaciones de Guipúzcoa y Vizcaya. Se ha seleccionado como mejor modelo el propuesto por Nay y Bormann (2014) para la especie en Oregón, cuya expresión es:

$$b_{aerea} = e^{-6,6292 + 2,669 \ln(dn)} + e^{-6,9137 + 2,9506 \ln(dn)} + e^{-3,77 + 2,2783 \ln(dn)} + e^{-2,0079 + 2,2776 \ln(dn)}$$

Al aplicar el modelo sobre los datos muestrados se obtiene un REMC de 11,8 kg M.S.

- *Larix sp.* En este caso se comparan modelos para distintas especies del género *Larix* con observaciones de 20 pies apeados en el P. Vasco, seleccionando el modelo propuesto por Usoltsev et al. (2020) para *Larix sibirica* con validez en Siberia, cuya expresión es:

$$b_{aerea} = 0,2342 \cdot (dn^{1,5672}) \cdot (h^{0,4054}) \cdot (dn^{0,0931 \ln(h)}) \cdot (e^{0,0016}) \cdot \frac{1}{1 + (0,2093 dn^{0,5056}) \cdot (h^{-0,1309}) \cdot (dn^{-0,1532 \ln(h)}) \cdot e^{-0,1975}}$$

Al aplicar el modelo sobre los datos muestreados se obtiene un REMC de 13.02 kg M.S. En el caso de no alcanzarla altura de 1.30 m se propone la siguiente ecuación, ajustada a partir de los datos muestreados, y que depende del diámetro de cuello de raíz d y la altura h

$$b_{aerea} = 0,0183 d^2 h + 2,7114$$

- *Cryptomeria japonica*. Para el caso de *Cryptomeria* se recomienda emplear el modelo propuesto por Lim et al. (2013) para la especie en Corea del Sur. Se trata de una ecuación dependiente del diámetro normal y la altura, cuya expresión completa es la siguiente

$$b_{aerea} = \frac{118,285 dn^{1,863} h^{0,493}}{1000}$$

2.2. Metodología basada en el uso de curvas de calidad estación y modelos de biomasa por hectárea

Esta metodología se fundamenta en (1) calcular el índice de calidad de estación para una especie dada en repoblaciones, definida como la altura media alcanzada por la plantación a una edad de referencia dada y (2) desarrollar modelos para estimarla biomasa fijada por hectárea repoblada en función de la edad de la plantación, la densidad de la misma y el índice de calidad de estación calculado en el paso (1).

Dados los distintos patrones de crecimiento entre masas naturales y repobladas, se han construido modelos dinámicos de crecimiento en altura de la repoblación en función de la edad y de las curvas de calidad de estación para diez especies forestales nativas españolas (*P. halepensis*, *P. nigra*, *P. pinea*, *P. pinaster* y *P. sylvestris*, y *Q. ilex*, *Q. suber*, *Q. faginea*, *Q. pyrenaica* y *Q. robur+petraea*) (Calama et al., 2024).

Mediante estos modelos se puede estimar la altura media de la repoblación (H_i) a una edad T_i a partir de la altura (H_j) de la repoblación a otra edad T_j , empleando una función del tipo:

$$H_i = f(T_i, T_j, H_j)$$

La Tabla 4 muestra los parámetros estimados para el mejor modelo seleccionado en cada especie, empleando la función anterior.

Tabla 4. Parámetros estimados según el modelo dinámico altura-crecimiento para las 10 especies seleccionadas.

Especie	Modelo	a_1	a_2
<i>Pinus sylvestris</i>	$H_2 = a_2 \left[\frac{H_1}{a_2} \right]^{\frac{\log(1-\exp(a_1 t_2))}{\log(1-\exp(a_1 t_1))}}$	-0,0070	75,0863
<i>P. pinea</i>	$H_2 = \exp(X_0)(1 - \exp(-a_1 t_2))^{a_2 + X_0}$ $X_0 = \frac{\log(H_1) - a_2 \log(1 - \exp(-a_1 t_1))}{1 + \log(1 - \exp(-a_1 t_1))}$	0,0022	-3,6977
<i>P. halepensis</i>	$H_2 = H_1 \left[\frac{1 - \exp(a_1 t_2)}{1 - \exp(a_1 t_1)} \right]^{a_2}$	0,0759	0,6520
<i>P. nigra</i>	$H_2 = a_2 \left[\frac{H_1}{a_2} \right]^{\frac{\log(1-\exp(a_1 t_2))}{\log(1-\exp(a_1 t_1))}}$	-0,0120	52,2884
<i>P. pinaster</i>	$H_2 = a_2 \left[\frac{H_1}{a_2} \right]^{\frac{\log(1-\exp(a_1 t_2))}{\log(1-\exp(a_1 t_1))}}$	-0,0111	65,4742
<i>Quercus robur+petraea</i>	$H_2 = H_1 \left[\frac{1 - \exp(a_1 t_2)}{1 - \exp(a_1 t_1)} \right]^{a_2}$	0,0953	0,6137
<i>Q. pyrenaica</i>	$H_2 = \exp(X_0)(1 - \exp(-a_1 t_2))^{a_2 + X_0}$ $X_0 = \frac{\log(H_1) - a_2 \log(1 - \exp(-a_1 t_1))}{1 + \log(1 - \exp(-a_1 t_1))}$	0,0011	-4,9734
<i>Q. faginea</i>	$H_2 = \frac{a_1}{1 - \left[1 - \frac{a_1}{H_1} \right] \left[\frac{t_1}{t_2} \right]^{a_2}}$	10,3165	1,0842
<i>Q. ilex</i>	$H_2 = \exp(X_0)(1 - \exp(-a_1 t_2))^{a_2 + X_0}$ $X_0 = \frac{\log(H_1) - a_2 \log(1 - \exp(-a_1 t_1))}{1 + \log(1 - \exp(-a_1 t_1))}$	0,0035	-3,2064
<i>Q. suber</i>	$H_2 = a_2 \left[\frac{H_1}{a_2} \right]^{\frac{\log(1-\exp(a_1 t_2))}{\log(1-\exp(a_1 t_1))}}$	-0,0275	13,2061

A partir de estos modelos se puede definir el **índice de calidad de estación de la repoblación (IS)** como la altura media esperada de la repoblación a una edad índice de 30 años (para el género *Pinus*) 20 años (para el género *Quercus*). Este índice permite comparar el nivel de desarrollo de diferentes repoblaciones con distintas edades, siendo la base para la construcción de familias de curvas de calidad de estación.

Además, para estas mismas 10 especies, se puede realizar una estimación del crecimiento en biomasa de una repoblación (B_{total}) empleando la densidad inicial de la

plantación (N), el índice de calidad de estación (IS) y la edad como variables predictoras (Calama et al., 2024) mediante la siguiente ecuación:

$$B_{\text{total}} = a_0 \cdot T^{(a_1 + a_2 \cdot N + a_3 \cdot \text{IS})}$$

, donde a_0 , a_1 , a_2 y a_3 son los parámetros a estimar.

Mediante estas ecuaciones se puede estimar la biomasa de una repoblación, adaptándose a las necesidades del usuario, teniendo en cuenta las diferentes escalas temporales y espaciales y los datos disponibles, pudiéndose realizar proyecciones en el tiempo de las existencias de biomasa y carbono de la repoblación.

La Tabla 5 muestra los parámetros estimados para el modelo de biomasa total $B_{\text{total}} = a_0 \cdot T^{(a_1 + a_2 \cdot N + a_3 \cdot \text{IS})}$, en función de la edad, la densidad de plantación y el índice de sitio, tomando como edad de referencia 30 años para las especies de *Pinus* y 20 años para las especies de *Quercus*.

Tabla 5. Parámetros estimados para el modelo de biomasa total ($B_{\text{total}} = a_0 \cdot T^{(a_1 + a_2 \cdot N + a_3 \cdot \text{IS})}$), en función de la edad, la densidad de plantación y el índice de sitio, tomando como edad de referencia 30 años para las especies de *Pinus* y 20 años para las especies de *Quercus*.

Especie	a_0	a_1	a_2	a_3
<i>P. sylvestris</i>	1156,3	0,78544	0,00006	0,03286
<i>P. pinea</i>	250,9	0,77303	0,00031	0,08417
<i>P. halepensis</i>	52,2	1,39838	0,00025	0,05534
<i>P. nigra</i>	233,8	1,01399	0,00021	0,05138
<i>P. pinaster</i>	111,0	1,34620	0,00023	0,03543
<i>Q. robur</i>	19,6	1,27524	0,00017	0,11824
<i>Q. pyrenaica</i>	635,8	0,05333	0,00010	0,16367
<i>Q. faginea</i>	38,0	0,86443	0,00019	0,22650
<i>Q. ilex</i>	3,8	2,03002	0,00024	0,19425
<i>Q. suber</i>	82,2	0,73551	0,00048	0,17603

Para el caso del castaño (*C. sativa* o castaños híbridos) y especies productivas (*eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, *Pinus radiata* y *Populus hyb.*) se han modelado de calidad de ecuaciones similares en formulación a los presentados para las especies nativas en la Tabla 4, pero con la particularidad de que, salvo para *Populus hyb.*, la altura incluida en la ecuación es la altura dominante (definida como altura media de los 100 pies más altos de la hectárea), y no la altura media de la plantación. Los modelos presentados en la tabla son los propuestos por Álvarez–Álvarez et al. (2010), para *Castanea sp.*; García–Villabril (2015), para *Eucalyptus globulus*; Dieguez–Aranda et al. (2009) para *Pinus radiata*; Pérez–Cruzado (2013) para *Eucalyptus nitens*, y Barrio–Anta et al. (2008) para *Populus hyb.*

Tabla 4.1. Parámetros estimados según el modelo dinámico altura–crecimiento para plantaciones productivas.

Especie	Modelo	a ₁	a ₂	a ₃	Edad ref
<i>Castanea spp.</i>	$H_2 = H_1 \left[\frac{1 - \exp(a_1 t_2)}{1 - \exp(a_1 t_1)} \right]^{a_2}$	-0,139	0,886	–	10
<i>Eucalyptus globulus</i>	$H_2 = \exp(X_0) \exp \left[- \left(\frac{a_1}{X_0} \right) t_2^{-a_2} \right]$ $X_0 = \frac{1}{2} t_1^{a_2} \left[t_1^{a_2} \log H_1 + \sqrt{4 \cdot a_1 t_1^{a_2} + (-t_1^{a_2} \log H_1)^2} \right]$	13,9	0,5989	–	7
<i>Eucalyptus nitens</i>	$H_2 = \frac{X_0}{1 + \frac{a_1}{X_0} t_2^{-a_2}}$ $X_0 = \frac{1}{2} \left[H_1 + \sqrt{(H_1)^2 + 4 a_1 H_1 t_1^{-a_2}} \right]$	1466	1,604	–	6
<i>Pinus radiata</i>	$H_2 = H_1 \left[\frac{1 - \exp(-a_1 t_2)}{1 - \exp(-a_1 t_1)} \right]^{(a_2 + \frac{a_3}{X_0})}$ $X_0 = \frac{1}{2} \left[\log(H_1) - a_2 F_0 + \sqrt{(\log(H_1) - a_2 F_0)^2 - 4 \cdot a_3 F_0} \right]$ $F_0 = \log(1 - \exp(-a_1 t_1))$	0,06738	-1,755	12,44	20
<i>Populus hyb</i>	$H_2 = a_1 \left[1 - \left[1 - \left(\frac{H_1}{a_1} \right)^{\frac{1}{a_2}} \right]^{t_2} \right]^{a_2}$	39,275	1,1121	–	8

A partir del índice de calidad de estación así definido, para la especie se presenta la ecuación de biomasa total por hectárea propuesta en Menéndez–Miguélez et al. (2023):

$$B_{\text{total}} = [a_0 + a_4 IS] \cdot T^{(a_1 + a_2 N + a_3 IS)}$$

Siendo a₀, a₄ parámetros a estimar, y que aparecen tabulados en la Tabla 5.1., donde también se presentan los valores de R² y REMC. Para *Eucalyptus nitens* y *Pinus radiata* la biomasa total se calcula mediante el modelo:

$$B_{\text{total}} = a_0 \cdot T^{(a_1 + a_2 N + a_3 IS)}$$

Mientras que para *Eucalyptus globulus*, el modelo empleado es:

$$B_{\text{total}} = N \cdot a_0 \cdot T^{(a_1 + a_2 N + a_3 IS)}$$

Tabla 5.1. Parámetros estimados para los modelos de biomasa total en función de la edad, la densidad de plantación y el índice de sitio para *Castanea sp.*, *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *Pinus radiata* y *Populus hyb.*

Especie	a_0	a_4	a_1	a_2	a_3	REMC	R2
<i>Castanea spp.</i>	1787,4	-147,6	-1,1235	0,00032	0,2863	5350	0,9314
<i>Eucalyptus globulus</i>	7,0685	-	0,9092	-0,00039	0,0452	25063	0,9361
<i>Eucalyptus nitens</i>	2901,2	-	0,9340	0,000117	0,0438	27980	0,9139
<i>Pinus radiata</i>	306,1	-	0,6951	0,000623	0,0437	30278	0,8033
<i>Populus hyb.</i>	537,9	-	1,3241	*	0,0431	-	-

* El modelo tiene validez para plantaciones por debajo de 400 pies/ha.

3. Métodos de muestreo para seguimiento en repoblaciones

3.1. Inventarios en campo

La verificación de la biomasa real fijada en una repoblación existente requiere de la realización de inventarios de campo de manera similar a los realizados para un inventario a nivel de monte, en las que es necesario considerar el error de muestreo y el tamaño de muestra. Actualmente, no existe una metodología estandarizada para el seguimiento de las repoblaciones forestales, aunque hay recomendaciones y criterios para mejorar la toma de datos en las mismas (p.ej. Hermosilla 2016). Las variables que se miden frecuentemente en las repoblaciones forestales son la altura, el diámetro (normal y del cuello de la raíz) y la supervivencia.

Para el diseño del muestreo hay que tener en cuenta el área de plantación, la densidad de plantación y la morfología de la plantación. Uno de los factores clave para optimizar la eficiencia del muestreo es determinar un tamaño de muestra según la especie, y que permitirá calcular los estadísticos de las variables medidas. Hermosilla (2016), para la estimación de los atributos de altura, diámetro y supervivencia, selecciona un error relativo del 30% y una probabilidad fiducial del 95%, lo que permite obtener resultados fiables. Así, para plantaciones de 50–60 individuos se puede muestrear entre 7–8 individuos. Además, hay que considerar la mortalidad de la plantación, que reducirá el número de individuos disponibles para el muestreo. Como no es posible realizar un ajuste anual actualizando el tamaño muestral en función de la mortalidad observada, se debe de tener en cuenta la dinámica de la repoblación, ajustando las intensidades de muestreo desde el comienzo del seguimiento. Por ejemplo, en ambientes mediterráneos se puede considerar mortalidades hasta del 50% en el segundo año, con una disminución posterior del 10%.

En el caso de repoblaciones de pequeña superficie y con densidad de plantación homogénea se recomienda realizar un muestreo sistemático, mediante transectos, parcelas circulares, cuadradas o rectangulares (Hermosilla, 2016). Las parcelas deben quedar bien localizadas dentro de la repoblación (p.ej. mediante coordenadas tomadas con GPS y etiquetado individual) para facilitar su precisa localización, lo que permitirá su seguimiento a lo largo del tiempo. Los muestreos aleatorios no se recomiendan por el posible sesgo que se deriva de la elección de individuos vivos, sin considerar los huecos que puede haber en la plantación.



El muestreo por **transectos** se utiliza en plantaciones en línea, empleándose una malla de muestreo, lo que permite distribuir los transectos a lo largo de la superficie de la plantación. Los muestreos se realizan en la línea de plantación más próxima a cada punto de intersección de la malla. En este caso es posible realizar el muestreo de un único árbol en la línea, el muestreo de una serie de árboles en la línea (por ejemplo, un *cluster* de cinco pies en la fila, centrado en el pie más cercano al nodo de intersección) o el muestreo de un grupo de pies (p.ej. 4) en dos filas adyacentes al punto de muestreo (Lupi et al., 2015). Los muestreos por grupos o *clusters* tienen la ventaja de la rapidez de medición una vez localizado el punto.

Otra alternativa, cuando la distribución de los individuos de la plantación es homogénea, es realizar un muestreo por **parcelas circulares, cuadradas o rectangulares**, siendo las circulares las más utilizadas. En cualquier caso, las parcelas se distribuyen de forma sistemática en los nodos de una malla de muestreo. Las parcelas pueden ser de superficie fija, o incluir un número fijo de pies alrededor del nodo. En las **parcelas circulares** se deben evitar radios superiores a 20 m, para facilitar la labor de medición. En el caso de **parcelas rectangulares o cuadradas** en repoblaciones con marco regular deben instalarse siempre dos laterales en la mitad exacta entre dos filas de plantación. Para **repoblaciones de baja densidad** (p.ej. redensificación de dehesas) se hace un muestreo sistemático, con malla de muestreo. A partir de cada uno de los nodos de la malla se muestrea un número determinado de plantas, siempre las más cercanas a cada nodo.

El muestreo estratificado es una alternativa a considerar en aquellos casos en los que dentro de la plantación se observen diferencias en desarrollo y supervivencia debidas a (1) distintas edades, (2) distintas especies o composición inicial o (3) distinta densidad de plantación. Incluso en plantaciones homogéneas de pequeño tamaño puede ser recomendable estratificar considerando las filas de borde como un estrato independiente de las filas del centro de plantación (Lupi et al., 2015).

Es importante tener en cuenta que si la parcela tiene una pendiente del 10% o más habrá que aumentar su área según el coseno del ángulo de inclinación de la pendiente (para parcelas cuadradas y rectangulares), o aumentar el diámetro en la dirección de la pendiente (forma de elipse, para parcelas circulares).

En cada una de las parcelas o transectos se medirá, según especies y tamaños, el número de marras o pies ausentes, el diámetro a la altura del cuello de la raíz, el diámetro normal y la altura de todos los pies. Posteriormente, se aplicarán las Ecuaciones de biomasa de árbol individual que incluyan esas variables como predictoras para calcular la biomasa de cada pie:

$$b_{\text{aerea}} = \beta_0 \cdot (d)^{\beta_1} \quad \text{Modelo 1}$$

$$b_{\text{aerea}} = \beta_2 \cdot (h)^{\beta_3} \quad \text{Modelo 2}$$

$$b_{\text{aerea}} = \beta_6 \cdot (d^2 h)^{\beta_7} \quad \text{Modelo 4}$$

A partir de esas ecuaciones de árbol individual y, por agregación, se calcula la biomasa contenida en la parcela, que se expresa en hectáreas, al dividirla por la superficie de la parcela. A partir de este valor de la parcela, y usando las fórmulas de estimadores propios asociados al tipo de muestreo, será posible asignar el valor medio y desviación

típica del valor de biomasa contenida en la parcela, y su extensión a la superficie global de la repoblación.

3.2. Muestreos mediante sensor remoto

En repoblaciones de gran tamaño, los inventarios de campo pueden sustituirse por inventarios a partir de ortofoto o vuelo LiDAR. La aplicación de la tecnología LiDAR a los inventarios forestales permiten una mayor densidad de muestreo, obteniendo medidas objetivas y homogéneas. A través del procesado de la nube de puntos LiDAR se pueden estimar diferentes variables, como pueden ser la fracción de cabida cubierta arbórea y la altura (Condés et al., 2013). Para realizar el inventario LIDAR se debe diseñar el vuelo y configurar el sensor elegido, estableciendo el número de retornos por m², así como la densidad mínima de puntos por m². La clasificación de la nube de puntos y la generación de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE con 1 metro de paso de malla) puede encargarse a la empresa proveedora de los datos LiDAR. Para el cálculo de los estadísticos de vegetación hay que considerar únicamente los puntos de vegetación correspondientes al estrato arbóreo evitando incluir en el cómputo los retornos del láser correspondientes a vegetación arbustiva. Es importante determinar el tamaño del pixel para el procesado de la imagen LIDAR. Además, es recomendable validar los resultados con inventarios realizados in situ en el campo para determinar el error de muestreo.

Aunque la tecnología LiDAR permite hacer inventario a nivel de rodal o tesela, para las repoblaciones puede interesar hacer estimaciones de árbol individual, lo que permite aplicar las Ecuaciones de biomasa de árbol individual. A partir de los valores obtenidos del procesado de las imágenes LiDAR se emplean las Ecuaciones de biomasa de árbol individual mostradas en el apartado 2 de este informe, seleccionando aquellas que utilizan como variable predictora la proyección de copa o la altura de la planta, variables que pueden inferirse de manera automatizada a partir de las imágenes o las nubes de puntos:

$$b_{aerea} = \beta_2 \cdot (h)^{\beta_3} \quad \text{Modelo 2}$$

$$b_{aerea} = \beta_4 \cdot (s_copa)^{\beta_5} \quad \text{Modelo 3}$$

$$b_{aerea} = \beta_8 \cdot (BP)^{\beta_9} \quad \text{Modelo 5}$$

Una alternativa a nivel de rodal consiste en estimar, a partir de las nubes de puntos LiDAR o la ortofoto, la altura media y el número de pies en parcelas circulares de radio fijo, y una vez conocida la edad de la plantación, calcular el índice de calidad de estación para la especie empleada, posteriormente calcular la biomasa total contenida en la parcela y luego extrapolar al total de la superficie. En este caso los cálculos podrían hacerse a nivel de pixel.

4. Bibliografía

- ÁLVAREZ– ÁLVAREZ, P; DÍAZ–VARELA, E; CÁMARA–OBREGÓN, A; AFIF–KHOURI, E; 2010. Relating growth and nutrition to site factors in young chestnut plantations established on agricultural and forest land in northern Spain. *Agroforestry Systems*. 79, 291–301. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9313-z>.
- BARRIO–ANTA, M; SIXTO–BLANCO, H; CAÑELLAS, I; CASTEDO–DORADO F. 2008. Dynamic growth model for I–214 poplar plantations In the northern and central plateaux in Spain. *Forest Ecology and Management*, 255, 1167–1178.
- CALAMA, R; MADRIGAL, G; DEL RÍO, M; LÓPEZ-SENEPLEDA, E; PARDOS, M; RUIZ-PEINADO, R; y MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M. 2024. Dynamic height growth equations and site index-based biomass models for young native species afforestations in Spain. *Forests*, 15(5), 827.
- CALAMA, R; RUÍZ–FERNANDEZ, F; MENÉNDEZ–MIGUÉLEZ, M; MADRIGAL, G; GARCÍA–CALAMA, T; y PARDOS, M. 2022. Nuevos modelos para estimación de biomasa y CO₂ fijado en plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* en Galicia. Actas del 8º CFE. Disponible online: <https://8cfe.congresoforestal.es/sites/default/files/actas/8CFE-1114.pdf>
- CONDÉS, S; FERNANDEZ–LANDA, A; y RODRÍGUEZ, F. 2013. Influencia del inventario de campo en el error de muestreo obtenido en un inventario con tecnología LiDAR. Actas del 6º CFE.
- CORRAL-RIVAS, J. J; DIÉGUEZ-ARANDA, U; RIVAS, S. C; y DORADO, F. C. 2007. A merchantable volume system for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forest Ecology and Management*, 238(1-3), 118-129.
- DIÉGUEZ–ARANDA, U; ROJO–ALBORECA, A; CASTEDO–DORADO, F; ÁLVAREZ–GONZÁLEZ, J.G; BARRIO–ANTA, M; CRECENTE–CAMPO, F; GONZÁLEZ–GONZÁLEZ, J.M; PÉREZ CRUZADO, C; RODRÍGUEZ–SOALLEIRO, R; LÓPEZ–SÁNCHEZ, C; BALBOA–MURIAS, M; GORGOSO–VARELA, J; SANCHEZ–RODRIGUEZ, F; y GÓMEZ–GARCÍA, E. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Xunta de Galicia.
- GARCÍA–VILLABRILLE, J.D. 2015. Modelización del crecimiento y la producción de plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. en el Noroeste de España. Tesis Doctoral. Universidad Santiago Compostela.
- GONZÁLEZ–GAARSLEV, D.; MENÉNDEZ–MIGUÉLEZ, M.; MADRIGAL, G; GARCÍA, M.; PARDOS, M.; DORRONSORO, B.; OMAÑAS, J.M.; CANTERO, A.; y CALAMA, R. 2025. Herramientas para la estimación de la biomasa en plantaciones de coníferas productivas en el País Vasco. Actas 9º Congreso Forestal Español. Comunicación 9CFE–1587.
- HERMOSILLA B. 2016. Elaboración de un protocolo para el muestreo en el seguimiento de repoblaciones forestales. Trabajo Fin de Máster. UAH, UPM, URJC.
- HERRERO, C; JUEZ, L; TEJEDOR, C. y BRAVO, F. 2014. Importance of root system in total biomass for *Eucalyptus globulus* in northern Spain. *Biomass and Bioenergy*, 67, 212–222.

- LUPI, C; LAROQUE, G; DESROCHERS, A; LABRECQUE, M; MOSSELER, A; MAJOR, J; BEAULIEU, J; TREMBLAY, F; GORDON, A.M.; THOMAS, B.R.; VÉZINA, A; BOUAFIF, H; CORNIER, D; SIDDER, D; KRYGIER, R; THEVATHASAN, N; RIOPEL, M. y FERLAND-RAYMOND, B. 2015. Evaluating sampling designs and deriving biomass equations for young plantations of poplar and willow clones. *Biomass and Bioenergy*, 83, 196–205.
- MENÉNDEZ–MIGUÉLEZ, M; ÁLVAREZ–ÁLVAREZ, P; PARDOS, M; MADRIGAL, G; RUIZ–PEINADO, R; LÓPEZ–SENEPLEDA, E; DEL RÍO, M; y CALAMA R. 2023. Development of tools to estimate the contribution of young sweet chestnut plantations to climate–change mitigation. *Forest Ecology and Management*, 530, 120761. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120761>.
- MENENDEZ–MIGUELEZ, M; CALAMA, R; DEL RÍO, M; MADRIGAL, G; LÓPEZ–SENEPLEDA, E; PARDOS, M; y RUIZ–PEINADO, R. 2022. Species–specific and generalized biomass models for estimating carbon stocks of young reforestations. *Biomass and Bioenergy*, 161, 106453. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106453>
- MENÉNDEZ–MIGUELEZ, M; RUIZ–PEINADO, R; DEL RÍO, M; y CALAMA, R. 2021. Improving tree biomass models through crown ratio patterns and incomplete data sources. *European Journal Forest Research*, 140(12).
- MONTERO, G; RUIZ-PEINADO, R.; y MUÑOZ, M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. INIA, Madrid.
- PÉREZ–CRUZADO, C.; BLANCO–SOUTO, A.; LÓPEZ–SÁNCHEZ, C.A.; EIMIL–FRAGA, C.; y RODRÍGUEZ–SOALLEIRO, R. 2013. Calidad de estación y productividad en plantaciones forestales de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden en el noroeste de España. Actas 6º CFE. Disponible online: <https://www.congresoforestal.es/actas/doc/6CFE/6CFE01–429.pdf>
- RUIZ–PEINADO, R; DEL RÍO, M.; y MONTERO, G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20, 176–188.
- RUIZ–PEINADO, R; MONTERO, G; y DEL RIO, M. 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, 21, 42.
- USOLTSEV, V. A; SHOB AIRI, S. O. R; TSEPORDEY, I. S; y ZUKOW, W. 2020. Allometric models to predicate single-tree biomass in the Eurasian *Larix* spp. forest. *Ecological Questions*, 32(1).
- LIM, H; LEE, K. H; LEE, K. H; y PARK, I. H. 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *Journal of Forest Research*, 18(4), 316–322.

ANEXO (A1). Estimaciones de biomasa subterránea y transformación a C fijado

En el informe se presentan herramientas para el cálculo de biomasa aérea. En el caso de querer dar estimaciones de biomasa total (aérea + subterránea) se utilizan las ratios biomasa raíz – biomasa aérea presentadas en Ruiz–Peinado et al. (2011, 2012), (excepto *Eucalyptus* sp., tomado de Herrero et al. (2014) y Castanea, tomado de Menéndez–Miguélez et al. (2023)), cuyo valor se presenta en la Tabla S1. Asimismo, en el caso de querer dar valores de CO₂ fijado se recomienda usar los valores de contenido de carbono en biomasa dados en Montero et al. (2005) y la relación del peso de la molécula de CO₂ (44) y el átomo de carbono (12).

Tabla S1. Valores de la razón biomasa de raíz – biomasa aérea, por especies, grupos de especies o tipo de mezcla

Especie	Root:Shoot ratio	Grupo de especie	Root:Shoot ratio
<i>Pinus sylvestris</i>	0,279	Frondosas caducifolias	0,449
<i>Pinus pinea</i>	0,243	Frondosas perennifolias ámbito mediterráneo	0,313
<i>Pinus halepensis</i>	0,229	Frondosas perennifolias medio árido	0,313
<i>Pinus nigra</i>	0,240	Coníferas mediterráneas	0,252
<i>Pinus pinaster</i> Mes.	0,285	Frondosas marcescentes	0,355
<i>Pinus pinaster</i> Atl.	0,285	Coníferas de montaña	0,268
<i>Pinus radiata</i>	0,265	Coníferas productivas zona atlántica	0,265
<i>Juniperus</i> sp	0,343	Mezclas	Root:Shoot ratio
<i>Q. robur+petraea</i>	0,466	Mezcla coníferas (Todas las zonas)	0,265
<i>Quercus pyrenaica</i>	0,353	Mezcla frondosas (zona Atlántica)	0,449
<i>Quercus faginea</i>	0,357	Mezcla frondosas (resto zonas)	0,334
<i>Quercus ilex</i>	0,323	Mezclas sin definir (todas las zonas)	0,366
<i>Quercus suber</i>	0,323		
<i>Fraxinus</i> sp.	0,504		
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,200		
<i>Eucalyptus nitens</i>	0,200		
<i>Olea europea</i>	0,303		
<i>Ceratonia siliqua</i>	0,313		
<i>Fagus sylvatica</i>	0,163		
<i>Castanea</i> sp.	**		
<i>Betula</i> sp.	0,466		
<i>Juglans</i> sp.	0,313		
<i>Populus x hybrid</i>	0,363		

** Para el caso de Castanea sp. la razón root_shoot ratio viene modelizada en Menéndez – Miguélez et al. (2023) en función de la edad de plantación T, siendo su expresión:

$$\text{Root-shoot ratio: } 3,1052 T^{-0,7437}$$

ANEXO (A2). Relaciones diámetro normal – diámetro de cuello de raíz para repoblaciones forestales

Los mejores modelos para estimación de biomasa individual para las principales especies utilizadas en repoblaciones forestales es España, derivados de Menéndez–Miguélez et al. (2022), y presentados en el apartado 2.1. de este informe, utilizan como variable predictora el diámetro de cuello de raíz d_{toc} (sola o en combinación con la altura h a través de la variable d_{toc}^2h), resultando mucho más precisa la estimación que en el caso del uso de los modelos que sólo incluyen la altura como potencial predictora.

Sin embargo, la medición del diámetro del cuello de raíz puede presentar algunos inconvenientes, como son la dificultad postural y el mayor tiempo invertido en tomar la medición, al requerir agacharse, o la dificultad de trabajo en montes o repoblados con abundante sotobosque de matorral. En otras ocasiones los propios protocolos de inventario han planteado medir únicamente el diámetro normal, o incluso realizar conteos por clases diamétricas referidas a diámetro normal. En el caso de tratarse de muestreos en repoblaciones, como podría ser el caso de inventarios *ex post* para determinar biomasa fijada por la plantación, el disponer únicamente en el inventario del dato del diámetro normal impediría la aplicación de los modelos desarrollados. Para ello, se han desarrollado una serie de modelos que permitan estimar de manera individual el diámetro en el cuello de raíz a partir del diámetro normal, y utilizar esta variable como predictora en modelos de biomasa anteriormente presentados.

De acuerdo al análisis exploratorio y a la literatura previa consultada (p.ej. Corral–Rivas et al. 2007) se identifica una relación lineal entre el diámetro en el cuello de raíz d_{toc} y el diámetro normal dn , proponiéndose el siguiente modelo de regresión lineal:

$$d_{toc} = \beta_0 + \beta_1 \cdot dn \quad (\text{Ec. M1}).$$

Como la mayor parte de los datos disponibles presentan estructura de dependencia jerarquizada (árboles en parcelas), se ha procedido a ajustar el modelo de la Ecuación 1 como un modelo mixto lineal, incluyendo parámetros aleatorios de parcela tanto en la constante como en la pendiente del modelo. Los valores de los estimadores de los parámetros del modelo M1 para las distintas especies analizadas, así como los estadísticos de bondad del ajuste Error medio (E), p–valor asociado a E y coeficiente de determinación R^2 se presentan en la Tabla S2.

Tabla S2. Valores de los parámetros (β_0 , β_1), intervalo de confianza (IC) y estadísticos de ajuste del modelo $d_{toc} = \beta_0 + \beta_1 \cdot dn$ para las distintas especies.

Especie	Constante		Pendiente (dn)		Estadísticos de ajuste		
	β_0	Int. Confianza	β_1	Int. Confianza	E	p-valor	R^2
<i>P. sylvestris</i>	3,554	3,023 – 4,085	1,040	1,003 – 1,077	-0,386	0,000	95,1%
<i>P. pinea</i>	6,179	5,624 – 6,733	0,979	0,937 – 1,022	0,037	0,533	95,7%
<i>P. halepensis</i>	5,564	5,165 – 5,963	1,106	1,073 – 1,140	-0,102	0,086	91,5%
<i>P. nigra</i>	3,819	3,286 – 4,351	1,053	0,996 – 1,110	0,042	0,427	96,0%
<i>P. pinaster</i>	4,732	4,153 – 5,312	1,006	0,970 – 1,042	-0,015	0,797	95,9%
<i>P. radiata</i>	2,200	0,902 – 3,498	1,062	1,023 – 1,101	-0,070	0,602	99,1%
<i>Pseudotsuga m.</i>	1,428	0,807 – 2,048	1,200	1,169 – 1,232	0,059	0,460	98,1%
<i>Larix sp</i>	1,327	0,981 – 1,673	1,164	1,131 – 1,198	0,000	1,000	97,1%
<i>Juniperus sp</i>	4,453	3,306 – 5,600	1,086	0,343 – 1,828	0,000	1,000	88,7%

Especie	Constante		Pendiente (dn)		Estadísticos de ajuste		
	β_0	Int. Confianza	β_1	Int. Confianza	E	p-valor	R ²
<i>Quercus rob+pet</i>	1,016	0,296 – 1,736	1,438	1,359 – 1,518	0,085	0,596	95,1%
<i>Quercus pyrenaica</i>	2,252	1,334 – 3,170	1,270	1,089 – 1,452	0,342	0,006	94,7%
<i>Quercus faginea</i>	4,232	3,260 – 5,205	1,137	1,037 – 1,238	-0,147	0,342	88,9%
<i>Quercus ilex</i>	5,066	4,518 – 5,615	1,083	0,985 – 1,182	-0,001	0,989	90,2%
<i>Quercus suber</i>	5,447	4,812 – 6,081	1,022	0,987 – 1,057	0,120	0,170	91,1%
<i>Fraxinus sp.</i>	2,038	1,204 – 2,871	1,288	1,213 – 1,363	0,208	0,108	94,2%
<i>Eucalyptus globulus</i>	1,184	0,922 – 1,446	1,118	1,077 – 1,160	0,028	0,594	97,6%
<i>Eucalyptus nitens</i>	1,041	0,633 – 1,450	1,092	1,055 – 1,129	0,004	0,954	97,2%
<i>Olea europaea</i>	7,489	6,246 – 8,731	0,710	0,323 – 1,096	0,000	1,000	45,8%
<i>Ceratonia siliqua</i>	6,218	5,338 – 7,098	0,949	0,876 – 1,022	0,000	1,000	78,7%
<i>Fagus sylvatica</i>	1,678	1,242 – 2,113	1,134	1,087 – 1,181	0,000	1,000	94,5%
<i>Castanea sp.</i>	2,250	1,767 – 2,733	1,078	1,026 – 1,130	-0,128	0,063	96,2%
<i>Betula sp.</i>	1,536	0,944 – 2,128	1,188	1,097 – 1,278	0,155	0,159	88,1%
<i>Populus x hybrid</i>	1,504	0,937 – 2,071	1,072	1,043 – 1,100	0,001	0,982	98,8%
<i>Sequoia sempervirens</i>	2,011	1,432 – 2,590	1,173	1,132 – 1,214	0,073	0,539	98,7%