

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

HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE CARBONO EN EL
MARCO DE PROYECTOS DE ABSORCIÓN DE GESTIÓN
FORESTAL MEJORADA: ALARGAMIENTO DE TURNO

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:

Núñez Manso, Y., Ramos, R., Pardos, M y Calama, R. 2025. Herramientas de estimación de carbono en el marco de proyectos de absorción de gestión forestal mejorada: alargamiento de turno. Versión 1. ICIFOR, INIA–CSIC. © 2025 by YOEL NÚÑEZ MANSO 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. Marco del proyecto.....	4
2. Objetivo.....	4
3. Estado del arte.....	5
4. Descripción de la metodología propuesta.....	6
5. Tabla resumen de las especificaciones de los modelos de crecimiento empleados para cada especie.....	8
6. Modelos de crecimiento por especie.....	10
6.1. <i>Betula alba</i>	10
6.2. <i>Castanea sativa</i>	15
6.3. <i>Eucalyptus globulus</i>	18
6.4. <i>Eucalyptus nitens</i>	22
6.5. <i>Fagus sylvatica</i>	25
6.6. <i>Pinus halepensis</i>	29
6.7. <i>Pinus nigra</i>	33
6.8. <i>Pinus pinaster</i> subsp. <i>atlantica</i>	38
6.9. <i>Pinus pinaster</i> subsp. <i>mesogeensis</i>	43
6.10. <i>Pinus pinea</i>	47
6.11. <i>Pinus radiata</i>	52
6.12. <i>Pinus sylvestris</i>	57
6.13. <i>Populus x americana</i>	62
6.14. <i>Pseudotsuga menziesii</i>	65
6.15. <i>Quercus pyrenaica</i>	68
6.16. <i>Quercus robur</i>	72
7. Ejemplo de uso de la aplicación Excel para <i>Pinus sylvestris</i>	77
8. Agradecimientos.....	83
9. Referencias.....	84
ANEXO (A1). Listado de abreviaturas y unidades.....	88

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	A2 Elaboración de nuevas herramientas de cálculo de gestión forestal mejorada
Título subacción	A.2.1. Desarrollo de Calculadoras de proyectos de absorción de gestión forestal mejorada.
Duración	M2–M18
Código resultado	R 2.2
Nombre del entregable	Calculadora de proyectos de absorción de mejora de la productividad.
Entidad coordinadora de la acción	INIA
Entidad coordinadora de la subacción	INIA

1. Marco del proyecto

La Oficina Española de Cambio Climático (OECC) ha sido pionera en el desarrollo de un sistema voluntario de registro de huella de carbono, proyectos de secuestro de carbono y reducción de emisiones a través del “Proyecto Clima” (MITECO, 2021). En el marco del sector forestal se ha despertado un alto interés por la generación de créditos ligados a proyectos de absorción por forestación, reforestación o restauración post incendios. Estos proyectos se fundamentan en la capacidad de fijación de carbono (C) atmosférico por parte de los nuevos bosques y terrenos forestales, generados de manera artificial en antiguos terrenos agrícolas, terrenos forestales yermos o bosques degradados (Bastin et al., 2019). De manera simultánea al auge de estos proyectos, surge la necesidad de desarrollar nuevos proyectos de absorción basados en la modificación de la gestión forestal actualmente aplicada en bosques ya establecidos, al objeto de optimizar la capacidad de fijación de C de los mismos (Ameray et al., 2021). La implementación de estos nuevos proyectos de absorción por gestión forestal mejorada permitirá ampliar y mejorar los sistemas voluntarios de registro de huella de carbono existentes.

En este contexto, el proyecto “Mejora de la contribución del sector forestal a la lucha contra el cambio climático, ECO2FOR”, (ECO2FOR, 2024) pretende reforzar la lucha contra el cambio climático mediante el desarrollo de proyectos absorción de carbono y mitigación en el ámbito forestal, atrayendo inversión privada y contribuyendo al desarrollo de actividad económica en el medio rural y lucha contra la despoblación. La segunda acción de este proyecto queda descrita como “Elaboración de nuevas herramientas de cálculo de gestión forestal mejorada (GFM)”. En concreto, se pretende el desarrollo de calculadoras de proyectos de absorción para poder determinar el aumento en los almacenes de C asociados a estos nuevos proyectos. En España, existen numerosos documentos que reflejan la selvicultura estándar propuesta para las distintas especies y formaciones forestales como el Compendio de Selvicultura de España (Serrada et al., 2008). Sin embargo, en la actualidad se han propuesto prácticas de gestión forestal, más allá de la regulación de la espesura, que pueden resultar en un aumento de la capacidad de absorción de los bosques por encima de sus niveles de base.

2. Objetivo

En el presente documento, se desarrollará la metodología propuesta para el cálculo de los stocks de carbono asociados a los proyectos de gestión forestal mejorada basados en el **alargamiento de turno**. El alargamiento del turno supone una mejora en los stocks de carbono por un mayor almacenamiento medio en pie, así como la obtención de productos de madera con mayor vida útil (Liskl et al., 2001), aunque el efecto depende de la especie. Para esta metodología, que permitirá el desarrollo posterior de calculadoras para la estimación del incremento de carbono debido a la implementación de prácticas de GFM, resulta necesario la calibración y adaptación de modelos de crecimiento (estáticos y dinámicos) actualmente existentes en España (Bravo et al., 2012) que permiten simular el desarrollo y proyección en el tiempo del volumen del rodal bajo una gestión dada y un turno determinado. Las salidas de estos modelos dadas en volumen, son posteriormente transformadas a biomasa y finalmente convertidas en absorciones generadas de CO₂ atmosférico.

A lo largo del presente documento, se desarrollarán las metodologías propuestas para el cálculo de los stocks de carbono por el alargamiento de turno para las principales masas forestales de nuestro país.

3. Estado del arte

Como ya se ha indicado la metodología se basa en la calibración y/o adaptación de modelos de crecimiento existentes en la actualidad en España. Los modelos de crecimiento y producción estáticos son sistemas estructurados de relaciones matemáticas, estadísticas y/o lógicas que no dependen, o no tienen en cuenta explícitamente, la tasa de crecimiento de los árboles y/o los rodales forestales (Vancly et al., 1994). Los modelos estáticos más habitualmente empleados son las tablas de producción. Estas se definen como cuadros numéricos que muestran la evolución en el tiempo de las variables de un rodal forestal coetáneo o regular, de una especie dada, dentro de un ámbito geográfico determinado, para distintas clases de calidad de estación y para uno o diferentes tratamientos selvícolas (Madrigal et al., 1999). La estructura básica del modelo estático que da lugar a las tablas de producción está formada, al menos, por cuatro ecuaciones o funciones de salida, tradicionalmente denominadas relaciones fundamentales. Estas relaciones fundamentales están asociadas a las variables de altura dominante, densidad, diámetro cuadrático y volumen (Diéguez-Aranda et al., 2009) (Tabla 1).

Por su parte, los modelos dinámicos sí tienen en cuenta la evolución en el tiempo (es decir, el crecimiento) de las variables descriptivas de los árboles y/o los rodales forestales, por lo que para su construcción es necesario disponer de datos recogidos en árboles o rodales inventariados al menos en dos ocasiones, y además el ajuste estadístico debe de realizarse con una metodología que permita tener en cuenta dicho crecimiento (Diéguez-Aranda et al., 2009). Los modelos de carácter dinámico predicen fundamentalmente tasas de cambio, es decir, el crecimiento de ciertas variables que definen el estado del sistema (por ejemplo, la altura dominante, el área basimétrica y el número de pies por hectárea) bajo condiciones distintas de densidad (Tabla 1). La estructura básica de los modelos dinámicos está constituida por variables o funciones de entrada o estado, funciones de transición y funciones de salida.

Las estructuras básicas de los modelos de crecimiento ya sean relaciones fundamentales para los modelos estáticos o ecuaciones de entrada y de salida para los modelos dinámicos, que dan lugar a las tablas de producción, suelen estar formada por las siguientes expresiones (Tabla 1):

Tabla 1. Estructuras básicas de las ecuaciones de los modelos de crecimiento.

	Ecuaciones
Primera relación fundamental (altura dominante)	$H_0 = f(t_2, t_1, IS)$
Segunda relación fundamental (densidad)	$N = f(t, H_0)$
Tercera relación fundamental (diámetro cuadrático)	$Dg = f(H_0, N)$
Cuarta relación fundamental (volumen)	$V = f(Dg, H_0, N)$
Quinta relación fundamental (altura media)	$H_m = f(H_0, N)$
Área basimétrica	$G = f(H_0, N, t)$
donde H_0 es la altura dominante, t_2 es la edad en el momento 2, t_1 es la edad de referencia, IS el índice de sitio, N es la densidad, Dg es el diámetro cuadrático, V es el volumen, H_m es la altura media y G es el área basimétrica.	
Nota: en la presente tabla se muestran a grandes rasgos cuáles son las variables de cada ecuación. Cada modelo particular tiene sus variables concretas y pueden no quedar ajustadas a las aquí descritas.	

Aunque ambos tipos de modelo han demostrado su validez, el uso de uno u otro tipo presenta a su vez ventajas e inconvenientes (Tabla 2):

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de los modelos estáticos y de los modelos dinámicos.

Modelo	Ventajas	Inconvenientes
Estáticos	(1) Sencillez en su formulación. (2) Disponibles para muchas especies.	(1) Dificil adaptación a datos reales de inventario. (2) Estiman mal fuera del rango de los valores de ajuste.
Dinámicos	(1) Permiten proyectar datos de inventario actual (área basimétrica). (2) Permiten simular mortalidad por autoclareo.	(1) Requieren función de inicialización (área basimétrica) en el caso de no disponer de inventario. (2) Requiere determinar diámetro medio cuadrático de los pies extraídos (función o fijar). (3) Construidos para pocas especies.

Dada las potenciales ventajas e inconvenientes de cada metodología, y la posibilidad de uso de una u otra basada en: (1) disponibilidad de los modelos y (2) datos de los que disponga el órgano gestor, en el presente informe se van a detallar las aproximaciones estáticas o dinámicas identificadas para las principales especies forestales españolas.

4. Descripción de la metodología propuesta

La metodología seguida para la modelización de la biomasa de las principales masas forestales del territorio nacional es la siguiente (Figura 1):

- 1) Búsqueda bibliográfica y selección de modelos estáticos y dinámicos de crecimiento, extracción de relaciones fundamentales y funciones de entrada y de salida y desarrollo de tablas de producción para los diferentes índices de en aras de obtener el volumen total de la masa.
- 2) Obtención del esquema de selvicultura y su aplicación del Compendio de selvicultura aplicada en España (Serrada et al., 2008), utilizado como línea base.
- 3) Conversión del volumen total del rodal en biomasa mediante el uso de factores de expansión de la biomasa o la aplicación de un factor de densidad de la madera con un contenido de humedad del 12 % tabulado por especies.
- 4) Comparación de la biomasa total calculado en la línea de base con la extensión del turno de corta propuesto.
- 5) Conversión de la biomasa en absorciones de CO₂ empleando la metodología propuesta por el Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEI, 2024).

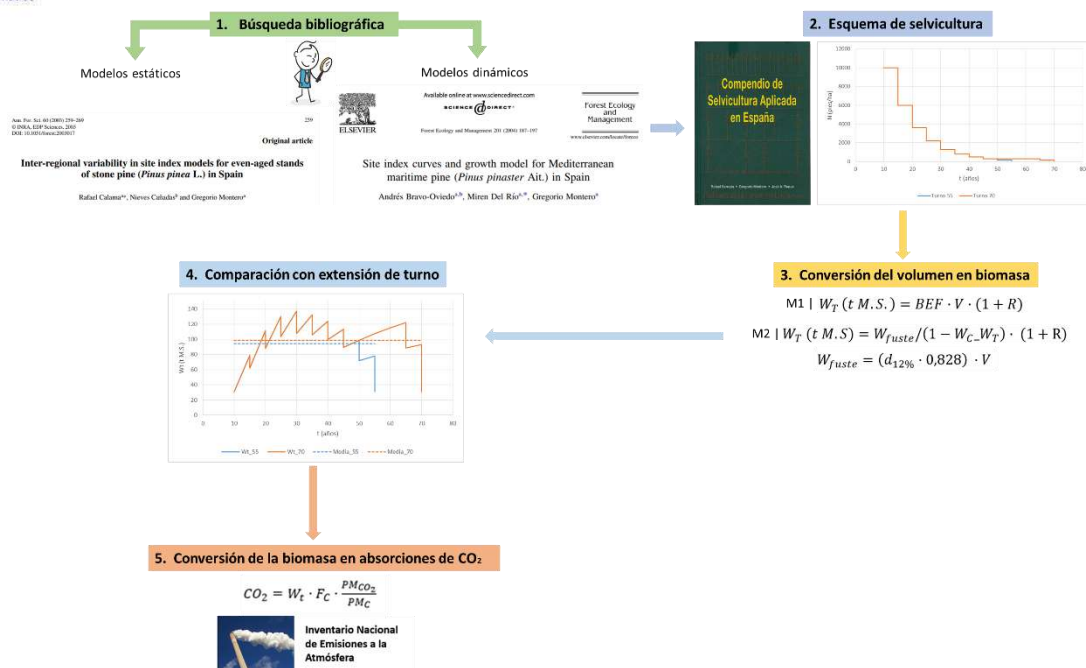


Figura 1. Esquema de la metodología propuesta.

5. Tabla resumen de las especificaciones de los modelos de crecimiento empleados para cada especie

Tabla 3. Resumen de las especies estudiadas con sus respectivos modelos (estático o dinámico), ámbito de aplicación (región), rango de edad de inventario a la que se desarrolla modelo, densidades con las que se construye el modelo y el tipo de masa selecciona para el desarrollo del mismo.

Especie	Modelo y tipo	Región	Rango de edad (años)	Rango de densidad (pies/ha)	Tipo de masa
<i>Betula alba</i>	Rojo et al. (2005). Estático.	Lugo, Ourense, A coruña.	12–60	–	Masas densas con aspecto regular.
	Diéguez–Aranda et al. (2009). Estático	Galicia	12–60	6000–390	Repoblaciones forestales.
	Diéguez–Aranda et al. (2009). Dinámico	Galicia	12–60	6000–390	Repoblaciones forestales.
<i>Castanea sativa</i>	Prada et al. (2019). Dinámico.	Asturias	18–61	2221–410	Monte bajo.
<i>Eucalyptus globulus</i>	García–Villalibre (2015). Dinámico.	Galicia	1–41	2000–594	Plantaciones coetáneas o regulares.
<i>Eucalyptus nitens</i>	Diéguez–Aranda et al. (2009). Estático	Lugo	2–24	–	Repoblaciones forestales.
<i>Fagus sylvatica</i>	Castañó–Santamaría et al. (2022). Estático.	Asturias y León	–	–	Masas naturales.
<i>Pinus halepensis</i>	Montero et al. (2001). Estático.	Albacete, Castellón, Jaén, Murcia, Teruel, Valencia y Zaragoza	49–83	773–493	Parcelas experimentales.
<i>Pinus nigra</i>	del Río et al. (2006). Estático.	Castilla y León	20–55	2213–470	Repoblaciones forestales.
	Gómez–Loranca (1996). Estático.	Sistema Ibérico	-	-	-
	Mora–Martínez et al. (2012). Dinámico.	Sistema Ibérico oriental, Sierras Costeras mediterráneas, Serranía conquense y Alta Alacarría y Serranías Béticas.	32–175	–	Masas regulares.
<i>Pinus pinaster</i> subsp. <i>atlantica</i>	Rodríguez–Soalleiro (1995). Estático.	Galicia.	7–25	5200–840	Masas de regeneración natural.
	Diéguez–Aranda et al. (2009). Dinámico	Galicia	25–45	2000–270	Repoblaciones forestales.
<i>Pinus pinaster</i> subsp. <i>mesogeensis</i>	Bravo–Oviedo et al. (2004). Dinámico.	Sistema Central	15–125	4960–189	Masas naturales y plantaciones.

Especie	Modelo y tipo	Región	Rango de edad (años)	Rango de densidad (pies/ha)	Tipo de masa
<i>Pinus pinea</i>	Calama et al. (2003) y Montero et al. (2008). Estático.	Meseta Norte, Sistema Central, oeste de Andalucía y Cataluña.	20–214	–	Masas regulares
	Calama et al. (2003) y Calama et al. (2007). Variante de dinámico.	Meseta Norte, Sistema Central, oeste de Andalucía y Cataluña.	20–214	–	Masas regulares
<i>Pinus radiata</i>	Sánchez et al. (2003). Estático.	Lugo, A Coruña y Pontevedra	19–41	–	–
	Diéguez–Aranda et al. (2009). Dinámico	Galicia	5–47	2048–183	Repoblaciones forestales.
<i>Pinus sylvestris</i>	del Río et al. (2006). Estático.	Castilla y León	20–60	1637–446	Repoblaciones forestales.
	Diéguez–Aranda et al. (2009). Dinámico.	Galicia	12–55	2720–580	Repoblaciones forestales.
	del Río (1999). Dinámico.	Sistema Central y Sistema Ibérico	20–75	5723–660	Masas naturales y plantaciones.
<i>Populus canadensis</i>	Barrio–Anta et al. (2008). Dinámico.	Castilla y León y Madrid	2–13	505–250	Plantaciones.
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	López–Sánchez (2009). Estático.	Galicia, Asturias, Castilla y León, Cantabria, País Vasco, La Rioja y Cataluña.	8–63	2128–280	Masas puras y regulares de plantación.
<i>Quercus pyrenaica</i>	Castaño–Santamaría (2013). Estático.	Galicia, Asturias, Cantabria, La Rioja y Castilla y León.	8–39	4642–423	Repoblaciones forestales.
<i>Quercus robur</i>	Diéguez–Aranda et al. (2009). Estático.	Galicia	34–155	30323–302	Repoblaciones forestales.
	Diéguez–Aranda et al. (2009). Dinámico.	Galicia	34–155	30323–302	Repoblaciones forestales.
Nota: los (–) quedan indicados para especificar que no se detalle la información en la descripción de los modelos.					

6. Modelos de crecimiento por especie

6.1. *Betula alba*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Betula alba*, como ejemplos de modelos estáticos se han empleado las relaciones fundamentales obtenidas de Rojo et al. (2005) y de Diéguez-Aranda et al. (2009) (Tabla 4). Las relaciones fundamentales para Rojo et al. (2005) han sido obtenidas de una experimentación de 119 parcelas, distribuidas mayoritariamente por la provincia de Lugo (Tabla 4.A). En este documento se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 8, 12 y 16 m. Por otro lado, las relaciones fundamentales del modelo de Diéguez-Aranda et al. (2009) han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia. En este documento, se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 7, 11 y 15 m (Tabla 4.B).

Tabla 4. Relaciones fundamentales para *Betula alba* de A) Rojo et al. (2005) y B) Diéguez-Aranda et al. (2009). La ecuación para la quinta relación fundamental es de elaboración propia. Fuente: Rojo et al. (2005) y Diéguez-Aranda et al. (2009).

A)	Relaciones fundamentales de del Rojo et al. (2005)
Primera relación fundamental	$H_{02} = H_{01} \cdot \left(\frac{(1 - \exp(-0,0009 \cdot H_{01}^{1,1151} \cdot t_2^{1,25}))}{(1 - \exp(-0,0009 \cdot H_{01}^{1,1151} \cdot t_1^{1,25}))} \right)$
Segunda relación fundamental	$N = 78426,086 \cdot H_{02}^{-1,60469}$
Tercera relación fundamental	$Dg = 14,14086 \cdot N^{-0,2731} \cdot H_{02}^{0,7355}$
Cuarta relación fundamental	$V = 0,6272 \cdot G^{0,9838} \cdot H_{02}^{0,8399}$
Quinta relación fundamental	$Hm = 0,8012 \cdot H_{02} + 1,458$
B)	Relaciones fundamentales de Diéguez-Aranda et al. (2009)
Primera relación fundamental	$H_{02} = \frac{19,80 + X_0}{1 + \frac{758,0}{X_0} \cdot t_2^{-1,398}}$ $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(H_{01} - 19,80 + \sqrt{(19,80 - H_{01})^2 + 4 \cdot 758,0 \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,398}} \right)$
Segunda relación fundamental	$N = 78426 \cdot H_{02}^{-1,600}$
Tercera relación fundamental	$Dg = 13,86 \cdot N^{-0,2721} \cdot H_{02}^{0,74}$
Cuarta relación fundamental	$V = 3,898 \cdot 10^{-5} \cdot Dg^{2,219} \cdot H_{02}^{0,6523} \cdot N^{1,015}$
Quinta relación fundamental	$Hm = 0,8012 \cdot H_{02} + 1,458$
donde N es el número de pies por hectárea, H ₀₂ la altura dominante en m, H ₀₁ es la calidad de estación, t ₂ es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha, G el área basimétrica en m ² /ha y Hm la altura media en m.	

Como ejemplo de modelo dinámico, las funciones para *Betula alba* también han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales ubicadas en Galicia contempladas en Diéguez–Aranda et al. (2009). El índice de sitio a la edad de referencia de 20 años es de 7, 11 y 15 m (Tabla 5).

Tabla 5. Funciones dinámicas para *Betula alba*. Fuente: Diéguez–Aranda et al. (2009).

Atributo	Ecuaciones
Transición para la altura dominante	$H_{02} = \frac{19,80 + X_0}{1 + \frac{758,0}{X_0} \cdot t_2^{-1,398}}$ $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(H_{01} - 19,80 + \sqrt{(19,80 - H_{01})^2 + 4 \cdot 758,0 \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,398}} \right)$
Función de transición para el número de pies por hectárea	$N_2 = \left(N_1^{\frac{-1}{1,581}} + 0,004637 \cdot \ln(H_{01}) \cdot \left(\left(\frac{t_2}{100} \right)^{1,581} - \left(\frac{t_1}{100} \right)^{1,581} \right) \right)^{-1,581}$
Función de transición del área basimétrica	$G_2 = \exp(X_0) \cdot \exp \left(\left(136,4 - \left(\frac{642,8}{X_0} \right) \right) \cdot t_2^{-0,9385} \right)$ $X_0 = \frac{t_1^{-0,9385}}{2} \cdot \left(-136,4 - t_1^{0,9385} \cdot \ln(G_1) + \sqrt{2571 \cdot t_1^{0,9385} + \left(136,4 - t_1^{0,9385} \cdot \ln(G_1) \right)^2} \right)$
Función de inicialización del área basimétrica	$G = 1,512 \cdot N^{0,3799} \cdot \exp \left(\frac{-27,01}{t} + 0,07972 \cdot H_{01} \right)$
Volumen	$V = 0,8003 \cdot G^{0,971} \cdot H_{02}^{0,7971}$
donde H_{02} es la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia, G el área basimétrica en m^2/ha , G_2 es el área basimétrica en m^2/ha en t_2 obtenida en función del G_1 en t_1 , N es la densidad en pies/ha en el momento en el que se quiere calcular la G , N_2 representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N_1 , V el volumen en m^3/ha .	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático y las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de selvicultura a partir del Compendio de Selvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 2). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 55 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 15 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones de los modelos estáticos y dinámicos, se obtiene el valor del volumen del rodal.

Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, Dg_{ext} . Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.1}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000} \right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

donde Dg_1 es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G_2 es el área basimétrica tras la clara y G_1 es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

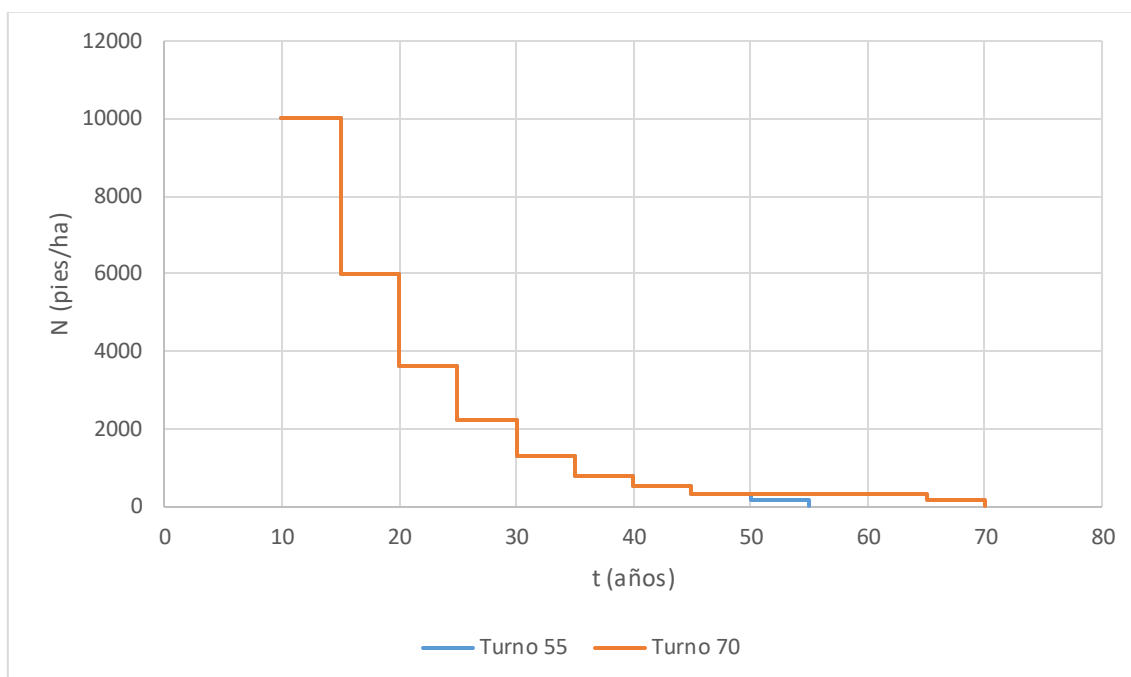


Figura 2. Esquema de claras para *Betula alba* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_t) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez-Miguélez et al. (2021) (Tabla 6) en combinación con Serrada et al. (2008) y SEI (2024).

Tabla 6. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 6,61 + 3,95 \cdot \left(\frac{Dg^2 \cdot H_m}{100} \right) + 2,989 \cdot \left(\frac{(Dg^2 \cdot H_m)^2}{10^8} \right)$	Pita (1967)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$	Menéndez–Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot H_m)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0437 y β_1 es 0,9099.	
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,2448$	
Relación raíz–vástago	$R = 0,202$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático en cm, Hm es la altura media en m, W_{fuste} es la biomasa del fuste, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.

- b) Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz–vástago de SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 7).

Tabla 7. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,596^*$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,2448$	Menéndez–Miguélez et al. (2021)
Relación raíz–vástago	$R = 0,202$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m^3/ha , $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.

*El valor de densidad de madera al 12 % de humedad es obtenido para la especie de *Betula verrucosa*.

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (48,5 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO₂ junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO₂ para los modelos presentados (Tabla 8):

Tabla 8. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el cómputo de los modelos definidos para Betula alba según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

	Rojo et al. (2005) Modelo estático		Diéguez Aranda et al. (2009) Modelo estático		Diéguez Aranda et al. (2009) Modelo dinámico	
	Metodología 1 (M1)					
Años	55	70	55	70	55	70
Biomasa media anual (t)	2,09	1,70	1,89	1,54	0,75	0,62
Biomasa acumulada anual (t)	5,94	4,86	5,05	4,16	2,88	2,39
1,10*4,26bsorción media anual (t)	3,72	3,03	3,37	2,74	1,34	1,10
Absorción acumulada anual (t)	10,56	8,63	8,98	7,40	5,12	4,26
	Metodología 2 (M2)					
Años	55	70	55	70	55	70
Biomasa media anual (t)	2,13	1,77	1,91	1,58	0,76	0,63
Biomasa acumulada anual (t)	6,05	5,00	5,10	4,24	2,93	2,44
Absorción media anual (t)	3,79	3,14	3,40	2,80	1,36	1,11
Absorción acumulada anual (t)	10,75	8,89	9,06	7,55	5,20	4,35
	Especificaciones empleadas para los modelos					
Índice de sitio / edad de referencia (años)	12 / 20		12 / 20		12 / 20	
Densidad inicial (pies/ha)	10000		10000		10000	
Relación raíz-vástago	SEI (2024)		SEI (2024)		SEI (2024)	
Esquema de claras	Compendio		Compendio		Compendio	

6.2. *Castanea sativa*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Castanea sativa*, únicamente se desarrolla un modelo dinámico. Las funciones para *Castanea sativa* han sido obtenidas de Prada et al. (2019) para el norte de la Península Ibérica, en la Comunidad Autónoma de Asturias de 32 parcelas permanentes. En este documento, se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado cinco calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 8, 12, 16, 20 y 24 m (Tabla 9).

Tabla 9. Funciones dinámicas para *Castanea sativa*. Fuente: Prada et al. (2019).

Atributo	Ecuaciones
Transición para la altura dominante	$H_{02} = H_{01} \cdot \left(\frac{1 - 7,69 \cdot EXP(61) \cdot t_1^{-0,5568}}{1 - 7,69 \cdot EXP(61) \cdot t_2^{-0,5568}} \right)$
Función de transición para el número de pies por hectárea	$N_2 = N_1 \cdot EXP(-0,0154 \cdot (t_2 - t_1))$
Función de transición del área basimétrica	$G_2 = 60,2861 \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{G_1}{60,2861} \right)^{\frac{1}{0,7335}} \right)^{\frac{t_2}{t_1}} \right)^{0,7335}$
Función de inicialización del área basimétrica	$G = 140,8743 \cdot (1 - EXP(-0,0063 \cdot t_1))^{\left(\frac{8,5121}{H_{01}} + \frac{310,5125}{N_1} \right)}$
Volumen	$V = 0,7901 \cdot G^{1,0106} \cdot H_{02}^{0,7729}$
donde H_{02} es la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m ² /ha, G_2 es el área basimétrica en m ² /ha en t_2 obtenida en función del G_1 en t_1 , N_2 representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N_1 , V el volumen en m ³ /ha.	

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de silvicultura a partir del Compendio de Silvicultura de España para su tratamiento en monte bajo (Serrada et al., 2008) (Figura 3). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 30 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 10 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones fundamentales del modelo dinámico, se obtiene el valor del volumen del rodal.

Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, Dg_{ext} . Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.1}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000} \right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

donde Dg_1 es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G_2 es el área basimétrica tras la clara y G_1 es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

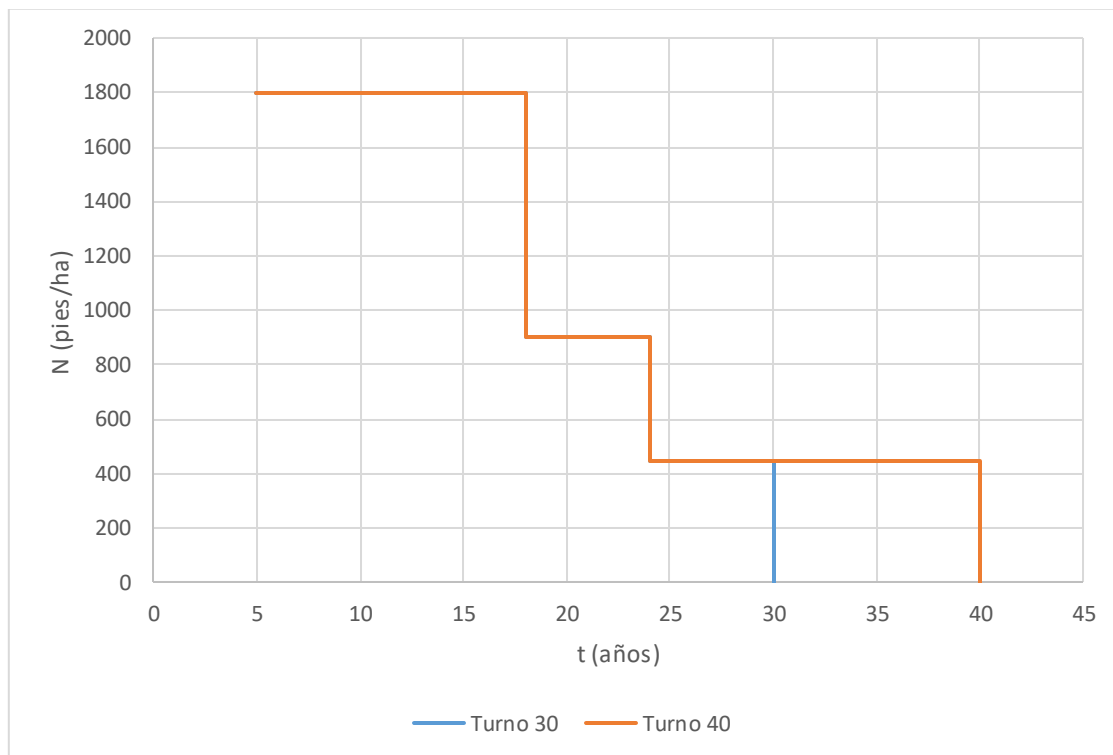


Figura 3. Esquema de claras para *Castanea sativa* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se propone la siguiente metodología:

- a) **Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruiz-Peinado et al. (2012) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 10).

Tabla 10. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T (t \text{ M.S}) = W_{fuste} / (1 - W_C - W_T) \cdot (1 + R)$	-
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)

Atributo	Ecuación	Fuente
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,441$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,1129$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Relación raíz-vástago	$R = 0,767$	Ruiz-Peinado et al. (2012)
Relación raíz-vástago	$R = 0,869$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m ³ /ha, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.		

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (48,4 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO₂ siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO₂ junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de la metodología de conversión de volumen a biomasa y de biomasa a absorciones de CO₂ para el modelo presentado (Tabla 11):

Tabla 11. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo dinámico de Castanea sativa según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de la metodología de cálculo de biomasa propuesta.

Prada et al. (2019) Modelo dinámico		
Metodología 2 (M2)		
Años	30	40
Biomasa media anual (t)	7,34	6,55
Biomasa acumulada anual (t)	20,54	16,76
Absorción media anual (t)	13,02	11,63
Absorción acumulada anual (t)	36,45	29,75
Especificaciones empleadas para el modelo		
Índice de sitio / edad de referencia (años)	16 / 20	
Densidad inicial (pies/ha)	1800	
Relación raíz-vástago	Ruiz-Peinado et al. (2012)	
Esquema de claras	Compendio	

6.3. *Eucalyptus globulus*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Eucalyptus globulus*, únicamente se desarrolla un modelo dinámico. Las funciones han sido obtenidas de García-Villalibre (2015) para el conjunto de Galicia a partir de una red de experimentación de 128 parcelas que forman parte de la red general de parcelas de distintas especies de la Unidad de Xestión Forestal Sostible (UXFS) de la Universidad de Santiago de Compostela (Tabla 12). En este documento, se define una edad de referencia de 7 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 7, 13, 19 y 25 m.

Tabla 12. Funciones dinámicas para *Eucalyptus globulus*. Fuente: García-Villalibre (2015).

Atributo	Ecuaciones
Transición para la altura dominante	$H_{02} = EXP(X_1) \cdot EXP\left(-\left(\frac{13,9}{X_1}\right) \cdot t_2^{-0,5989}\right)$ $X_1 = \frac{1}{2} \cdot t_1^{0,5989} \cdot \left(t_1^{0,5989} \cdot \ln(H_{01}) + \sqrt{4 \cdot 13,9 \cdot t_1^{0,5989} + (-t_1^{0,5989} \cdot \ln(H_{01}))^2}\right)$
Función de transición para el número de pies por hectárea	$N_2 = \left(N_1^{-0,5} + 0,1995 \cdot \left(\left(\frac{t_2}{100}\right)^2 - \left(\frac{t_1}{100}\right)^2\right)\right)^{-2}$
Función de transición del área basimétrica	$G_2 = EXP(X_1) \cdot EXP\left(-\left(\frac{21,16}{X_1}\right) \cdot t_2^{-0,9906}\right)$ $X_1 = \frac{1}{2} \cdot t_1^{0,9906} \cdot \left(t_1^{0,9906} \cdot \ln(G_1) + \sqrt{4 \cdot 21,16 \cdot t_1^{0,9906} + (-t_1^{0,9906} \cdot \ln(G_1))^2}\right)$
Función de inicialización del área basimétrica	$G = EXP(X_1) \cdot EXP\left(-\left(\frac{23,78}{X_1}\right) \cdot t_2^{-0,8689}\right)$ $X_1 = 1,819 \cdot H_{01}^{0,2564}$
Volumen	$V = 0,6234 \cdot G^{1,108} \cdot H_{02}^{0,8642} \cdot N^{-0,0598}$
donde H_{02} es la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m^2/ha , G_2 es el área basimétrica en m^2/ha en t_2 obtenida en función del G_1 en t_1 , N es la densidad en pies/ha en el momento en el que se quiere calcular la G , N_2 representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N_1 , V el volumen en m^3/ha .	

Tras la aplicación de las funciones del modelo dinámico, se obtiene el valor del volumen del rodal. Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, Dg_{ext} . Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.1}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000}\right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

donde Dg_1 es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G_2 es el área basimétrica tras la clara y G_1 es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- a) Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_t) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología adaptada a la desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 13) en combinación con Ruíz–Peinado et al. (2012) o SEI (2024).

Tabla 13. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. La ecuación de altura media es de elaboración propia a partir de los datos de parcelas de Eucalyptus nitens que el ICIFOR, INIA–CSIC ha muestreado en Galicia en colaboración con ENCE.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,0489 \cdot Dg^{1,679} \cdot H_m^{1,186}$	García–Villalibre (2015)
Altura media	$H_m = 0,9306 + 0,7461 \cdot H_{02}$	ICIFOR, INIA–CSIC con ENCE
Biomasa árbol unitario	$W_u = 0,0772 \cdot (Dg^2 \cdot H_m)^{0,8981}$	Calama et al. (2022)
Relación raíz–vástago	$R = 0,495$	Ruiz–Peinado et al. (2012)
Relación raíz–vástago	$R = 0,771$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático en cm, H_m es la altura media en m, R es la relación raíz – vástago.		

- b) García–Villalibre (2015).** Se propone el desarrollo de un sistema de ecuaciones aditivas para el cálculo de la biomasa del rodal. Para la estimación de la biomasa de la fracción considerada para el rodal se tiene en cuenta la biomasa de hojas, ramillos, ramas gruesas, madera y corteza (Tabla 14).

Tabla 14. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total por García–Villalibre (2015).

Atributo	Ecuación
Biomasa total	$W_T \text{ (kg M.S.)} = W_l + W_t + W_{br} + W_w + W_b \cdot (1+R)$
Biomasa hojas	$W_l = 539,9 \cdot G^{0,6724}$
Biomasa ramillos	$W_t = 224,04 \cdot G^{0,6809}$
Biomasa ramas gruesas	$W_{br} = 432,03 \cdot G^{0,9581}$
Biomasa madera	$W_w = 157,8 \cdot G^{1,0001} \cdot H_{02}^{1,018}$
Biomasa corteza	$W_b = 100,3 \cdot G^{1,012} \cdot H_{02}^{0,4641}$
Relación raíz–vástago Ruíz–Peinado et al. (2012)	$R = 0,495$
Relación raíz–vástago SEI (2024)	$R = 0,771$

donde W_T es la biomasa total (subíndices: l = hojas; t = ramillos; br = ramas; w: madera; b = corteza), kg M.S. son los kilogramos de materia seca, G es el área basimétrica en m²/ha, H₀₂ es la altura dominante en m, R es la relación raíz–vástago.

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (47,5 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO₂ siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO₂ junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa a absorciones de CO₂ para el modelo presentado (Tabla 15):

Tabla 15. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo dinámico de Eucalyptus globulus su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

		García-Villalibre (2015)	
		Modelo dinámico	
		Metodología 1 (M1)	
	Años	22	27
	Biomasa media anual (t)	6,69	6,17
	Biomasa acumulada anual (t)	9,37	8,49
	Absorción media anual (t)	11,65	10,74
	Absorción acumulada anual (t)	16,32	14,79
		Metodología García-Villalibre	
	Años	22	27
	Biomasa media anual (t)	4,44	4,11
	Biomasa acumulada anual (t)	6,24	5,68
	Absorción media anual (t)	7,73	7,15
	Absorción acumulada anual (t)	10,86	9,89
Especificaciones empleadas para el modelo			
	Índice de sitio / edad de referencia (años)	13 / 7	
	Densidad inicial (pies/ha)	1800	
	Relación raíz-vástago	Ruíz-Peinado et al. (2012)	
	Esquema de claras	Sin claras	

6.4. *Eucalyptus nitens*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Eucalyptus nitens*, únicamente se desarrolla un modelo estático. Las relaciones fundamentales han sido obtenidas de Diéguez–Aranda et al. (2009) (Tabla 16). Las relaciones fundamentales del modelo han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia. En este documento, se define una edad de referencia de 6 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 10, 14 y 18 m.

Tabla 16. Relaciones fundamentales para *Eucalyptus nitens*. La ecuación de altura media (quinta relación fundamental) es de elaboración propia a partir de los datos de parcelas de *Eucalyptus nitens* que el ICIFOR, INIA–CSIC ha muestreado en Galicia en colaboración con ENCE. Fuente: Diéguez–Aranda et al. (2009).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = \frac{X_0}{1 + \left(\frac{1466}{X_0 \cdot t_2^{-1,604}} \right)}$ $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(H_{01} + \sqrt{H_{01}^2 + 4 \cdot 1466 \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,604}} \right)$
Segunda relación fundamental	$N = N_{t-1} - N_{t-1} \cdot (1 - EXP(-A))$ $A = EXP(-8,6 + 0,1124 \cdot H_{015} + 0,1487 \cdot (t_2 - 0,5) - 0,0067 \cdot (t_2 - 0,5)^2)$
Tercera relación fundamental	$dg = 23,24 \cdot N^{-0,3463} \cdot H_{02}^{0,7055}$
Cuarta relación fundamental	$V = 6,80 \cdot 10^{-5} \cdot dg^{1,937} \cdot H_{02}^{0,8000} \cdot N^{1,006}$
Quinta relación fundamental	$Hm = 0,9306 + 0,7461 \cdot H_{02}$
donde N es el número de pies por hectárea, N_{t-1} es el número de pies por hectárea en la edad anterior a la estimada en N, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, H_{015} es la altura dominante en m a los 15 años, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha y Hm la altura media en m.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, dado el rápido crecimiento de la especie, se propone una gestión sin claras con una única corta final a los 22 años. Esta corta será comparada con un alargamiento del turno final de corta de 10 años. Tras la de las relaciones fundamentales del modelo estático, se obtiene el valor del volumen del rodal.

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se la siguiente metodología:

- Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (Wt) a partir del volumen total (V), teniendo en cuenta el coeficiente raíz–vástago (SEI, 2024). La propuesta es calcular el volumen del árbol (Vu) y la biomasa del árbol medio (Wu) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media) (Tabla 17).

Tabla 17. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,1571 \cdot Dg^{1,775} \cdot Hm^{0,772}$	ICIFOR, INIA–CSIC con ENCE
Biomasa árbol unitario	$W_u = 0,0089 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{1,0949}$	Calama et al. (2022)
Relación raíz–vástago	$R = 0,495$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m³/ha, BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en m, W_{fuste} es la biomasa del fuste, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.		

b) Metodología 2 (M2). Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % para Australia (Zanne et al. 2009), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz–vástago de SEI (2024) (Tabla 18).

Tabla 18. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,540$	Zanne et al. (2009)
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,2448$	Menéndez–Miguélez et al. (2021)
Relación raíz–vástago	$R = 0,495$	Ruiz–Peinado et al. (2012)
Relación raíz–vástago	$R = 0,495$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m³ /ha, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.		

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 1}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (47,5 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de la metodología de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO_2 para el modelo presentado (Tabla 19):

Tabla 19. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Eucalyptus nitens* y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de la metodología de cálculo de biomasa propuesta.

Diéguez-Aranda et al. (2009)		
Modelo estático		
Metodología 1 (M1)		
Años	22	32
Biomasa media anual (t)	12,85	13,11
Biomasa acumulada anual (t)	27,47	24,45
Absorción media anual (t)	22,39	22,82
Absorción acumulada anual (t)	47,85	42,58
Metodología 2 (M2)		
Años	22	32
Biomasa media anual (t)	14,26	13,50
Biomasa acumulada anual (t)	27,49	23,09
Absorción media anual (t)	24,84	23,51
Absorción acumulada anual (t)	47,88	40,21
Especificaciones empleadas para el modelo		
Índice de sitio / edad de referencia (años)	14 / 6	
Densidad inicial (pies/ha)	1500	
Relación raíz-vástago	Ruíz-Peinado et al. (2012)	
Esquema de claras	Sin claras	

6.5. *Fagus sylvatica*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Fagus sylvatica*, únicamente se desarrolla un modelo estático. Las relaciones fundamentales han sido obtenidas de Castaño–Santamaría et al. (2022) (Tabla 20). Las relaciones fundamentales del modelo han sido obtenidas a partir de inventario de rodales naturales a lo largo del noroeste de la Cordillera Cantábrica (97 parcelas en Asturias y 15 en León). En este documento, se define una edad de referencia de 80 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 6, 12, 18 y 24 m.

Tabla 20. Relaciones fundamentales para *Fagus sylvatica*. Fuente: Castaño–Santamaria et al. (2022).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = \frac{23,8753 + X_0}{1 + \left(\frac{20526,03}{X_0}\right) \cdot t_2^{-1,51}}$ $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(H_{01} - 23,8753 + \sqrt{(H_{01} - 23,8753)^2 + 4 \cdot 20526,03 \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,51}} \right)$
Segunda relación fundamental	$N = 1,00630298 \cdot EXP(11,77927) \cdot H_{02}^{-1,63664}$
Tercera relación fundamental	$dg = 1,006302985 \cdot EXP(5,632281) \cdot N^{-0,46971} \cdot H_{02}^{0,260024}$
Cuarta relación fundamental	$V = 1,00761799 \cdot G^{1,046832} \cdot H_{02}^{0,644167}$
Quinta relación fundamental	$Hm = 1,01340619 + H_{02}^{0,895929}$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha, G el área basimétrica en m ² /ha y Hm la altura media en m.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de silvicultura a partir del Consejo Regional de Midi – Pyrénées (Hazi, 2022) (Figura 4). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 140 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 20 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones fundamentales del modelo estático, se obtiene el valor del volumen del rodal.

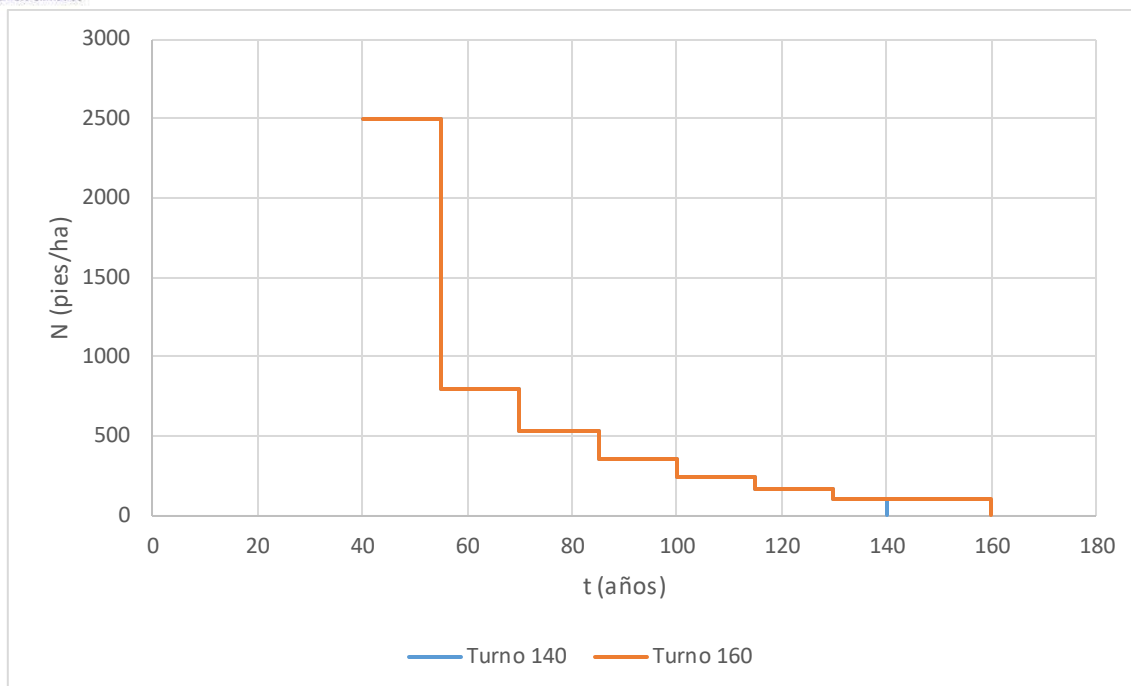


Figura 4. Esquema de claras para *Fagus sylvatica* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Hazi (2022).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se la siguiente metodología:

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_T) a partir del volumen total (V), teniendo en cuenta el coeficiente raíz-vástago (SEI, 2024). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media) (Tabla 2). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez-Miguélez et al. (2021) (Tabla 21) en combinación con Ruíz-Peinado et al. (2012) o SEI (2024).

Tabla 21. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,0791122 \cdot Dg^{1,95731} \cdot Hm^{0,75504}$	Martínez-Millán et al. (1993)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_c \cdot W_T)$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0657 y β_1 es 0,9064	
Relación de copa	$W_c \cdot W_T = 0,2784$	
Relación raíz-vástago	$R = 0,163$	Ruíz-Peinado et al. (2012)
Relación raíz-vástago	$R = 0,859$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático en cm, Hm es la altura media en m, W_{fuste} es la biomasa del fuste, $W_c \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

- b) **Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad

de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2012) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 22).

Tabla 22. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C - W_T) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,772$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_C - W_T = 0,2784$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Relación raíz-vástago	$R = 0,163$	Ruíz-Peinado et al. (2012)
Relación raíz-vástago	$R = 0,859$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m^3/ha , $W_C - W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.		

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C},$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (48,6 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO_2 para el modelo presentado (Tabla 23):

Tabla 23. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de Fagus sylvatica según la línea base establecida por el Consejo Regional de Midi – Pyrénées y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

Castano–Santa María et al. (2022)		
Modelo estático		
Metodología 1 (M1)		
Años	140	160
Biomasa media anual (t)	2,81	2,59
Biomasa acumulada anual (t)	4,81	4,52
Absorción media anual (t)	5,01	4,61
Absorción acumulada anual (t)	8,57	8,05
Metodología 2 (M2)		
Años	140	160
Biomasa media anual (t)	2,45	2,27
Biomasa acumulada anual (t)	3,85	3,63
Absorción media anual (t)	4,37	4,05
Absorción acumulada anual (t)	6,86	6,47
Especificaciones empleadas para el modelo		
Índice de sitio / edad de referencia (años)	18 / 80	
Densidad inicial (pies/ha)	2500	
Relación raíz–vástago	SEI (2024)	
Esquema de claras	Consejo Regional de Midi – Pyrénées	

6.6. *Pinus halepensis*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus halepensis*, únicamente se desarrolla un modelo estático. Se han empleado una modificación de las relaciones fundamentales obtenidas de Montero et al. (2001) (Tabla 24) a partir de una red de experimentación que consta de 72 parcelas distribuidas en las provincias de Albacete, Castellón, Jaén, Murcia, Teruel, Valencia y Zaragoza. En este documento, se define una edad de referencia de 80 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 11, 14, 17 y 20 m.

Tabla 24. Relaciones fundamentales para *Pinus halepensis*. Fuente: modificado de Montero et al. (2001).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = H_{01} \cdot \frac{[1 - EXP(-0,0203954 \cdot t_2)]^{\frac{1}{1,046295}}}{[1 - EXP(-0,0203954 \cdot t_1)]^{\frac{1}{1,046295}}}$
Segunda relación fundamental	$\ln(N) = 9,40793 - 1,16872 \cdot \ln(H_{02})$
Tercera relación fundamental	$Dg = -7,30304 + 1,18309 \cdot H_{02} + 3,63489 \cdot \left(\frac{100}{\sqrt{N}}\right)$
Cuarta relación fundamental	$V = \left(\frac{N}{1000}\right) \cdot 0,077186 \cdot Dg^{1,84818} \cdot H_{02}^{0,88012}$
Quinta relación fundamental	$H_m = -0,57881 + 0,910849 \cdot H_{02}$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha y Hm la altura media en m.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de silvicultura a partir del Compendio de Silvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 5). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 80 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 20 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones fundamentales del modelo estático, se obtiene el valor del volumen del rodal.

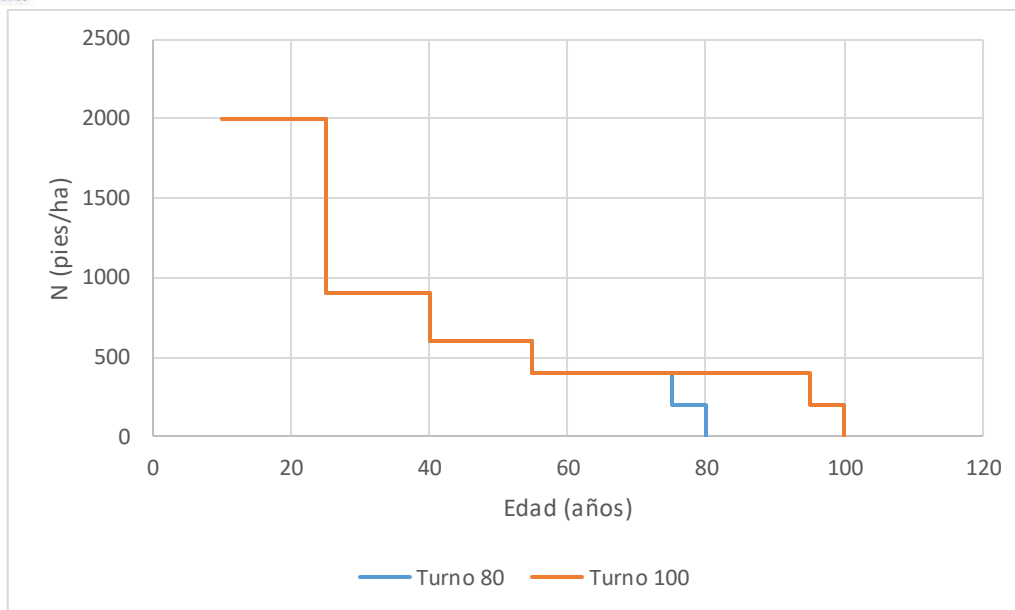


Figura 5. Esquema de claras para *Pinus halepensis* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_T) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez-Miguélez et al. (2021) pero con datos no publicados (Tabla 25) en combinación con Montero et al. (2001) y SEI (2024).

Tabla 25. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,077186 \cdot Dg^{1,84818} \cdot Hm^{0,88012}$	Montero et al. (2001)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T})$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0374 y β_1 es 0,9192.	
Relación de copa	$W_{C-W_T} = 0,428$	
Relación raíz-vástago	$R = 0,229$	Ruíz-Peinado et al. (2011)
Relación raíz-vástago	$R = 0,309$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en m, W_{fuste} es la biomasa del fuste, W_{C-W_T} es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

b) **Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 26).

Tabla 26. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C - W_T) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,546$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_C - W_T = 0,428$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Relación raíz-vástago	$R = 0,229$	Ruiz-Peinado et al. (2011)
Relación raíz-vástago	$R = 0,309$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m^3/ha , $W_C - W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 1,})$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (49,9 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa a absorciones de CO_2 para el modelo presentado (Tabla 27):

Tabla 27. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de Pinus halepensis según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

		Montero et al. (2001)	
		Modelo estático	
		Metodología 1 (M1)	
	Años	80	100
	Biomasa media anual (t)	1,17	1,09
	Biomasa acumulada anual (t)	2,42	2,12
	Absorción media anual (t)	2,15	1,99
	Absorción acumulada anual (t)	4,43	3,88
		Metodología 2 (M2)	
	Años	80	100
	Biomasa media anual (t)	1,03	0,96
	Biomasa acumulada anual (t)	2,12	1,85
	Absorción media anual (t)	1,89	1,75
	Absorción acumulada anual (t)	3,87	3,38
Especificaciones empleadas para el modelo			
	Índice de sitio / edad de referencia (años)	14 / 80	
	Densidad inicial (pies/ha)	2000	
	Relación raíz-vástago	Ruíz-Peinado et al. (2011)	
	Esquema de claras	Compendio	

6.7. *Pinus nigra*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus nigra*, se desarrollan dos modelos estáticos y un modelo dinámico. Como ejemplos de modelos estáticos se han empleado las relaciones fundamentales obtenidas de del Río et al. (2006) y de Gómez–Loranca (1996) (Tabla 28). Las relaciones fundamentales para del Río et al. (2006) han sido obtenidas del inventario de Castilla y León en el cual se describen repoblaciones forestales para esta especie. En este documento, se define una edad de referencia de 50 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 12, 15, 18 y 21 m (Tabla 28.A). Por otro lado, las relaciones fundamentales del modelo de Gómez–Loranca (1996) han sido obtenidas a partir de inventario en el Sistema ibérico con una edad de referencia de 60 años y 5 calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 8, 11, 14, 17 y 20 m (Tabla 28.B).

Tabla 28. Relaciones fundamentales para *Pinus nigra* de A) del Río et al. (2006) y B) Gómez–Loranca (1996). Para el desarrollo del modelo de Gómez–Loranca (1996), las ecuaciones de altura dominante y de altura media serán las mismas que las empleadas por del Río et al. (2006). Fuente: del Río et al. (2006) y Gómez–Loranca (1996).

A)	Relaciones fundamentales de del Río et al. (2006)
Primera relación fundamental	$H_{02} = 29,7954 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{H_{01}}{29,7954} \right)^{\frac{1}{1,5162}} \right]^{\frac{t_2}{t_1}} \right\}^{1,5162}$
Segunda relación fundamental	$\ln(N) = 9,47848 - 1,05677 \cdot \ln(H_{02})$
Tercera relación fundamental	$Dg = 1,11728 \cdot \left(\frac{100}{\sqrt{N}} \right) + 1,29117 \cdot H_{02}$
Cuarta relación fundamental	$\ln(V) = -0,502695 + 1,00797 \cdot \ln(G) + 0,862933 \cdot \ln(H_{02})$
Quinta relación fundamental	$Hm = 0,1456 + 0,9626 \cdot H_{02}$
B)	Relaciones fundamentales de Gómez–Loranca (1996)
Segunda relación fundamental	$\log \left(\sqrt{\frac{N}{H_{01}}} \right) = 2,357 - 0,6305 \cdot \log(Hm^2) \cdot \sqrt{H_{01}}$
Tercera relación fundamental	$Dg = -6,0651 + 5,4085 \cdot \left(\frac{10^2}{\sqrt{N}} \right) + 0,7728 \cdot H_{02}$
Cuarta relación fundamental	$V = -17,208 + 0,4969 \cdot (G \cdot H_{02})$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha, G el área basimétrica en m ² /ha y Hm la altura media en m	

Como ejemplo de modelo dinámico, las funciones para *Pinus nigra* han sido obtenidas de la red de parcelas permanentes instaladas por el INIA pertenecientes al Sistema Ibérico oriental, Sierras Costeras mediterráneas, a la Serranía conquense y Alta Alacaría y a las Serranías Béticas definido en Mora–Martínez et al. (2012). El índice de sitio a la edad de referencia de 80 años varió entre las parcelas de 8 a 27 m (Tabla 29).

Tabla 29. Funciones dinámicas para *Pinus nigra*. El modelo dinámico por el cual se desarrolla la metodología es el contemplado en Mora-Martínez et al. (2012). Sin embargo, por falta de algunas variables y para una modelización adecuada se han incorporado ciertas ecuaciones de del Río et al. (2006). Fuente: del río et al. (2006) y Mora-Martínez et al. (2012).

Atributo	Ecuaciones	Fuente
Altura dominante	$H_{02} = 29,7954 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{H_{01}}{29,7954} \right)^{\frac{1}{1,5162}} \right]^{\frac{t_2}{t_1}} \right\}^{1,5162}$	del Río et al. (2006)
Función de inicialización del área basimétrica	$G = \left(1,11728 \cdot \left(\frac{100}{\sqrt{N}} \right) + 1,29117 \cdot H_{02} \right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{40.000} \right) \cdot N$	Elaboración propia a partir del diámetro cuadrático de del Río et al. (2006)
Función de transición del área basimétrica	$LnG_2 = \left(\frac{t_1}{t_2} \right) \cdot LnG_1 + 3,88 \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) + 0,0475 \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) \cdot H_{01}$	Mora-Martínez et al. (2012)
Volumen	$LnV = 1,69 + 0,0604 \cdot H_{01} + (-48,8) \cdot t_1^{-1} + 0,982 \cdot LnG$	Mora-Martínez et al. (2012)

donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación en m, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia, G el área basimétrica en m²/ha, G_2 es el área basimétrica en m²/ha en t_2 obtenida en función del G_1 en t_1 , V el volumen en m³/ha.

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático y las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de selvicultura a partir del Compendio de Selvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 6). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 110 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 20 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones fundamentales de los modelos estáticos y dinámicos, se obtiene el valor del volumen del rodal.

Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, Dg_{ext} . Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.1}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000} \right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

donde Dg_1 es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G_2 es el área basimétrica tras la clara y G_1 es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

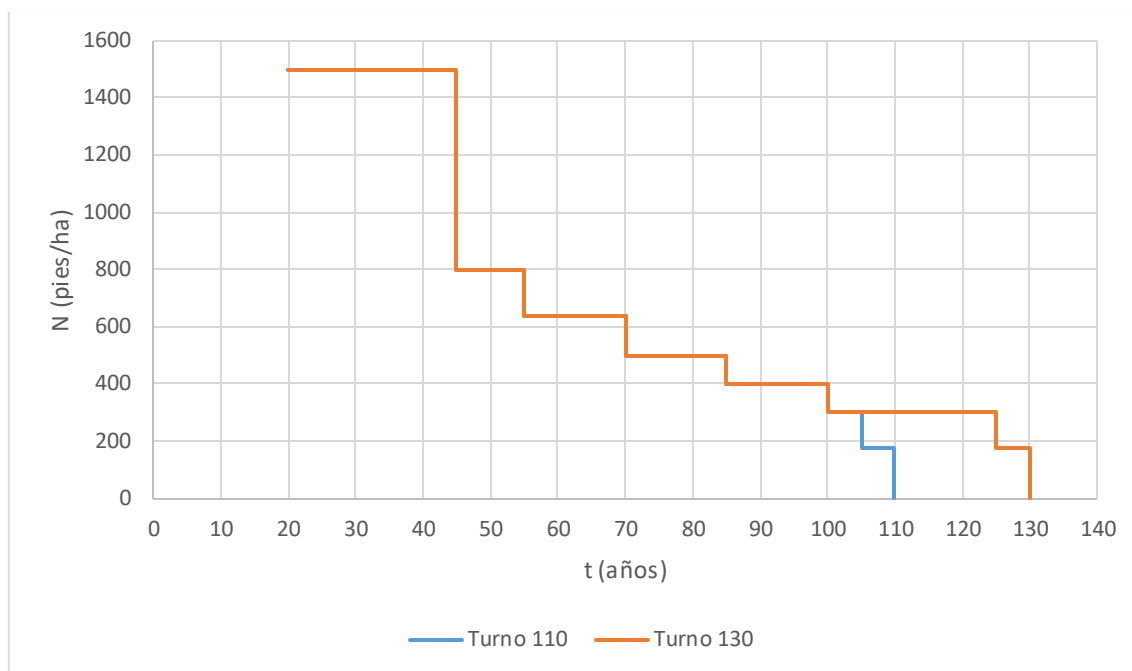


Figura 6. Esquema de claras para *Pinus nigra* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_t) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez-Miguélez et al. (2021) (Tabla 30) en combinación con Pita (1967) y Ruíz-Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

Tabla 30. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T (t \text{ M.S.}) = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 4,285 \cdot \left(\frac{Dg^2 \cdot Hm}{100} \right) + 2,989 \cdot \left(\frac{(Dg^2 \cdot Hm)^2}{10^8} \right)$	Pita (1967)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T})$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0219 y β_1 es 0,9812.	
Relación de copa	$W_{C-W_T} = 0,3526$	
Relación raíz-vástago	$R = 0,242$	Ruiz-Peinado et al. (2011)

Atributo	Ecuación	Fuente
Relación raíz- vástago	$R = 0,244$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, D_g es el diámetro cuadrático, H_m es la altura media, W_{fuste} es la biomasa del fuste, W_{C-W_T} es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.		

b) Metodología 2 (M2). Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 31).

Tabla 31. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T}) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,48714$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_{C-W_T} = 0,3526$	Menéndez- Miguélez et al. (2021)
Relación raíz- vástago	$R = 0,242$	Ruiz-Peinado et al. (2011)
Relación raíz- vástago	$R = 0,244$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m^3/ha , W_{C-W_T} es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.		

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (50,9 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO_2 para los modelos presentados (Tabla 32):

Tabla 32. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el cómputo de los modelos definidos para *Pinus nigra* según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

	Gómez–Loranca (1996) <i>Modelo estático</i>		del Río et al. (2006) <i>Modelo estático</i>		Mora–Martínez et al. (2012) <i>Modelo dinámico</i>	
	Metodología 1 (M1)					
Años	110	130	110	130	110	130
Biomasa media anual (t)	3,12	2,82	2,46	2,16	1,68	1,76
Biomasa acumulada anual (t)	6,12	5,42	6,63	5,79	4,42	4,59
Absorción media anual (t)	5,82	5,27	4,59	4,03	3,14	3,29
Absorción acumulada anual (t)	11,42	10,12	12,38	10,80	8,24	8,57
	Metodología 2 (M2)					
Años	110	130	110	130	110	130
Biomasa media anual (t)	3,68	3,35	2,87	2,53	1,95	2,06
Biomasa acumulada anual (t)	7,20	6,42	7,78	6,81	5,19	5,46
Absorción media anual (t)	6,86	6,25	5,36	4,73	3,64	3,85
Absorción acumulada anual (t)	13,43	11,98	14,52	12,71	9,68	10,18
	Especificaciones empleadas para los modelos					
Índice de sitio / edad de referencia (años)	17 / 50		17 / 50		20 / 80	
Densidad inicial (pies/ha)	1500		1500		1500	
Relación raíz–vástago	Ruíz–Peinado et al. (2011)		Ruíz–Peinado et al. (2011)		SEI (2024)	
Esquema de claras	Compendio		Compendio		Compendio	

6.8. *Pinus pinaster* subsp. *atlantica*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus pinaster* subsp. *atlantica*, se desarrollan un modelo estático y un modelo dinámico. Las relaciones fundamentales han sido obtenidas de Rodríguez–Soalleiro (1995) (Tabla 33) a partir de una red de experimentación fundamentado en 98 parcelas ubicadas en Galicia y en otros datos de relación entre alturas medias y dominantes correspondientes a la red de parcelas permanentes de estudios de claras del IFIE. En este documento, se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado 9 calidades de estación.

Tabla 33. Relaciones fundamentales para *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* de Rodríguez–Soalleiro (1995). La primera relación fundamental referida a la altura dominante es obtenida de Diéguez–Aranda et al. (2009). Fuente: Rodríguez–Soalleiro (1995) y Diéguez–Aranda et al. (2009).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = \frac{72,69 - 27,86 \cdot 1 + X_0}{1 - (2,993 + 5,084 \cdot 1) \cdot X_0 \cdot t_2^{-1,486}}$ $X_0 = \frac{H_{01} - 72,69 + 27,86 \cdot 1}{1 + (2,993 + 5,084 \cdot 1) \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,486}}$
Segunda relación fundamental	$\frac{100}{\sqrt{N}} = 1,8397 + 0,0175 \cdot H_{02}^{1,65}$
Tercera relación fundamental	$Dg = -9,93157 + 2,8793 \cdot \frac{100}{N^{0,4}} + 0,8071 \cdot H_{02}$
Cuarta relación fundamental	$V = 6,60596 + 0,0000451 \cdot N \cdot Dg^2 \cdot H_{02}$
Quinta relación fundamental	$H_m = \frac{H_{02} - 0,674092}{1,050719}$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación en m, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha y H_m la altura media en m.	

Como ejemplo de modelo dinámico, las funciones para *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia del modelo desarrollado por Diéguez–Aranda et al. (2009) (Tabla 34). En este documento, se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado 4 calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 11, 16, 21 y 26 m.

Tabla 34. Funciones dinámicas para *Pinus pinaster* subsp. *atlantica* de Diéguez–Aranda et al. (2009). La ecuación de altura media es la desarrollada por Rodríguez–Soalleiro (1995). Fuente: Rodríguez–Soalleiro (1995) y Diéguez–Aranda et al. (2009).

Atributo	Ecuaciones
Altura dominante	$H_{02} = \frac{72,69 - 27,86 \cdot 1 + X_0}{1 - (2,993 + 5,084 \cdot 1) \cdot X_0 \cdot t_2^{-1,486}}$ $X_0 = \frac{H_{01} - 72,69 + 27,86 \cdot 1}{1 + (2,993 + 5,084 \cdot 1) \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,486}}$
Altura media	$H_m = \frac{H_{02} - 0,674092}{1,050719}$
Función de transición del número de pies	No existe: apenas existe disminución del número de pies por competencia en las parcelas estudiadas.

Atributo	Ecuaciones
Función de inicialización del área basimétrica	$G = EXP(X_0) \cdot EXP\left(-\left(-167,5 + \left(\frac{999,1 - 50,34 \cdot 1}{X_0}\right)\right) \cdot t^{-0,8936}\right)$ $X_0 = (4,363 - 0,1489 \cdot 1) \cdot IS^{0,07383}$
Función de transición del área basimétrica	$G_2 = EXP(X_0) \cdot EXP\left(-\left(-167,5 + \left(\frac{999,1 - 50,34 \cdot 1}{X_0}\right)\right) \cdot t_2^{-0,8936}\right)$ $X_0 = \frac{t_1^{-0,8936}}{2} \cdot \left(-167,5 + t_1^{0,8936} \cdot \ln(G_1)\right)$ $+ \sqrt{4 \cdot (999,1 - 50,34 \cdot 1) \cdot t_1^{0,8936} + (167,5 - t_1^{0,8936} \cdot \ln(G_1))^2}$
Volumen	$V = 5,480 \cdot 10^{-4} \cdot Dg^{1,430-0,07553 \cdot 1} \cdot H_0^{1,220} \cdot N^{0,7681+0,02974 \cdot 1}$
donde N es el número de pies por hectárea, H ₀₂ la altura dominante en m, H ₀₁ es la calidad de estación, Hm es la altura media en m, t ₂ es la edad en años, t ₁ es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m ² /ha, G ₂ es el área basimétrica en m ² /ha en t ₂ obtenida en función del G ₁ en t ₁ , V el volumen en m ³ /ha, N ₂ representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N ₁ , IS es el índice de sitio, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, Hm es la altura media en m.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático y las funciones para los modelos dinámicos, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de selvicultura a partir del Compendio de Selvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 7). La estimación del C fijado por la línea base para el *Pinus pinaster* subsp *atlantica*, con turno de 50 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 10 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones de los modelos estáticos y dinámicos, se obtiene el valor del volumen del rodal.

Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, Dg_{ext}. Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.1}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000}\right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

donde Dg₁ es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G₂ es el área basimétrica tras la clara y G₁ es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

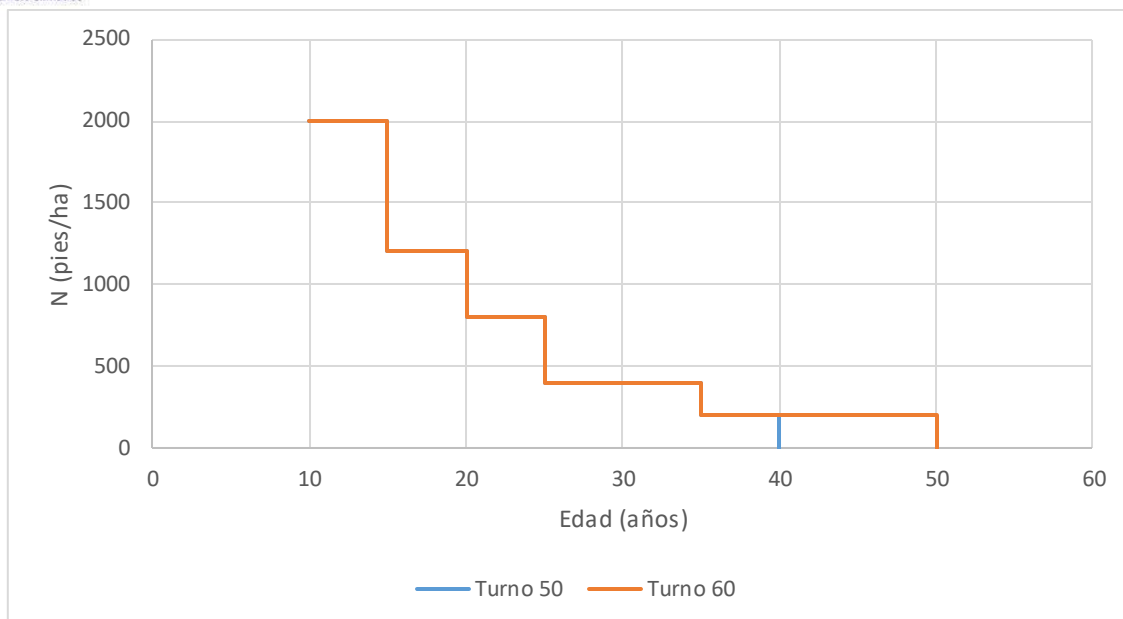


Figura 7. Esquema de claras para *Pinus pinaster subsp. atlantica* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_T) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 35) en combinación con Diéguez–Aranda (2009) y Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

Tabla 35. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,036115 \cdot dg^{2,1249} \cdot Hm^{0,84716}$	Diéguez–Aranda (2009)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$	Menéndez–Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0175 y β_1 es 0,9961.	
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,1873$	
Relación raíz–vástago	$R = 0,285$	Ruíz–Peinado et al. (2011)
Relación raíz–vástago	$R = 0,284$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en m, W_{fuste} es la biomasa del fuste, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.

b) **Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 36).

Tabla 36. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C - W_T) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,5285$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_C - W_T = 0,1873$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Relación raíz-vástago	$R = 0,285$	Ruiz-Peinado et al. (2011)
Relación raíz-vástago	$R = 0,284$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m^3/ha , $W_C - W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (51,1 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa a absorciones de CO_2 para los modelos presentados (Tabla 37):

Tabla 37. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el cómputo de los modelos definidos para Pinus pinaster subsp. atlantica según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

	Rodríguez–Soalleiro (1995) <i>Modelo estático</i>		Diéguez–Aranda et al. (2009) <i>Modelo dinámico</i>	
	Metodología 1 (M1)			
Años	40	50	40	50
Biomasa media anual (t)	4,25	3,71	5,83	5,02
Biomasa acumulada anual (t)	9,03	8,16	16,03	14,72
Absorción media anual (t)	7,97	6,95	10,92	9,40
Absorción acumulada anual (t)	16,93	15,30	30,04	27,58
	Metodología 2 (M2)			
Años	40	50	40	50
Biomasa media anual (t)	3,98	3,48	5,49	4,76
Biomasa acumulada anual (t)	8,10	7,32	15,01	13,88
Absorción media anual (t)	6,95	6,53	10,29	8,91
Absorción acumulada anual (t)	15,18	13,72	28,13	26,01
	Especificaciones empleadas para los modelos			
Índice de sitio / edad de referencia (años)	13 / 20		16 / 20	
Densidad inicial (pies/ha)	2000		2000	
Relación raíz–vástago	SEI (2024)		SEI (2024)	
Esquema de claras	Compendio		Compendio	

6.9. *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis*, se desarrolla un modelo dinámico. Como ejemplo del modelo dinámico para *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* se han empleado las relaciones fundamentales desarrolladas en Bravo-Oviedo et al. (2004) (Tabla 38). Los datos han sido obtenidos de 92 parcelas permanentes del INIA-ICIFOR. En este documento, se define una edad de referencia de 80 años y se han fijado 5 calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 9, 12, 15 18, 21 m.

Tabla 38. Funciones dinámicas para *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* de Bravo-Oviedo et al. (2004). La ecuación de altura media es la desarrollada por Rodríguez-Soalleiro (1995). La ecuación de inicialización del área basimétrica es la obtenida en del Río et al. (2006). Fuente: Rodríguez-Soalleiro (1995), Bravo-Oviedo et al. (2004), del Río et al. (2006).

Atributo	Ecuaciones
Altura dominante	$H_{02} = EXP\left(4,016 + (LnH_{01} - 4,016) \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{-0,5031}\right)$
Altura media	$H_m = \frac{H_{02} - 0,674092}{1,050719}$
Función de transición del número de pies	$N_2 = N_1 \cdot EXP(-0,00069 \cdot (t_2 - t_1))$
Función de inicialización del área basimétrica	$Dg = -11,65 + 6,634 \cdot \frac{100}{\sqrt{N}} + 0,716 \cdot H_0 \quad (1)$ $G = \frac{\pi}{40000} \cdot Dg^2 \cdot N \quad (2)$
Función de transición del área basimétrica	$LnG_2 = \left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot LnG_1 + \left((4,746618 + 0 \cdot IS) \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right)\right)$
Volumen	$LnV = 1,916498 + 0,061317 \cdot IS + \left(\frac{-34,2235}{t}\right) + 0,849985 \cdot LnG$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, H_m es la altura media en m, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m ² /ha, G_2 es el área basimétrica en m ² /ha en t_2 obtenida en función del G_1 en t_1 , V el volumen en m ³ /ha, N_2 representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N_1 , IS es el índice de sitio, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, H_m es la altura media en m.	

Una vez definidas las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de selvicultura a partir del Compendio de Selvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 8). La estimación del C fijado por la línea base para el *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* (Figura 8), con turno de 80 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 20 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones fundamentales del modelo dinámico, se obtiene el valor del volumen del rodal.

Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer,

Dg_{ext} . Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.1}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000} \right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

donde Dg_1 es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G_2 es el área basimétrica tras la clara y G_1 es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

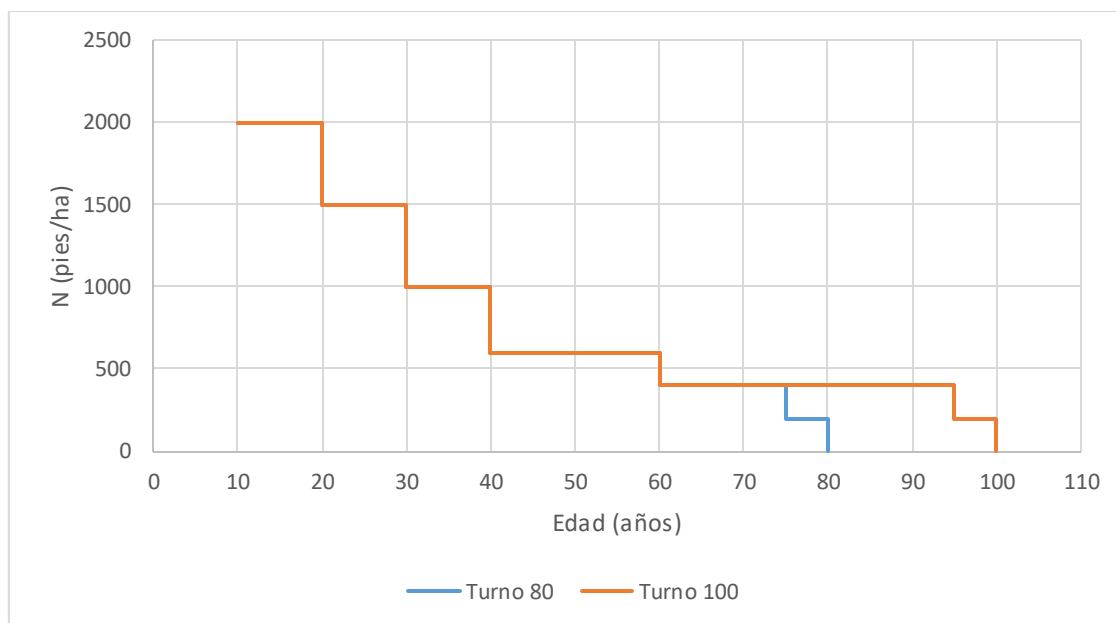


Figura 8. Esquema de claras para *Pinus pinaster subsp. mesogeensis* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_t) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguel et al. (2021) (Tabla 39) en combinación con Diéguez–Aranda (2009) y Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

Tabla 39. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,036115 \cdot dg^{2,1249} \cdot Hm^{0,84716}$	Diéguez-Aranda (2009)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0175 y β_1 es 0,9961.	
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,1873$	
Relación raíz-vástago	$R = 0,285$	Ruíz-Peinado et al. (2011)
Relación raíz-vástago	$R = 0,284$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m³/ha, BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en m, W_{fuste} es la biomasa del fuste, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

b) Metodología 2 (M2). Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 40).

Tabla 40. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,5285$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,1873$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Relación raíz-vástago	$R = 0,285$	Ruíz-Peinado et al. (2011)
Relación raíz-vástago	$R = 0,284$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m³/ha, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_c es el factor de carbono (51,1 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_c es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO_2 para el modelo presentado (Tabla 41):

Tabla 41. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO_2 medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo dinámico de Pinus pinaster subsp. mesogeensis según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

		Bravo-Oviedo et al. (2004) Modelo dinámico	
		Metodología 1 (M1)	
	Años	80	100
	Biomasa media anual (t)	0,97	0,95
	Biomasa acumulada anual (t)	3,22	2,83
	Absorción media anual (t)	1,81	1,79
	Absorción acumulada anual (t)	6,02	5,31
		Metodología 2 (M2)	
	Años	80	100
	Biomasa media anual (t)	0,95	0,93
	Biomasa acumulada anual (t)	3,18	2,77
	Absorción media anual (t)	1,77	1,74
	Absorción acumulada anual (t)	5,95	5,20
Especificaciones empleadas para el modelo			
	Índice de sitio / edad de referencia (años)	15 / 80	
	Densidad inicial (pies/ha)	2000	
	Relación raíz-vástago	SEI (2024)	
	Esquema de claras	Compendio	

6.10. *Pinus pinea*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus pinea*, se desarrollan modelo estático y una adaptación de modelo dinámico. Las relaciones fundamentales han sido obtenidas de Calama et al. (2003) y Montero et al. (2008) (Tabla 42). Las relaciones han sido obtenidas del inventario de España en el cual se describen repoblaciones forestales para esta especie. En este documento, se define una edad de referencia de 100 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 9, 13, 17 y 21 m.

Tabla 42. Relaciones fundamentales para *Pinus pinea*. Fuente: Calama et al. (2003) y Montero et al. (2008).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = EXP\left(4,1437 + (\ln(H_{01}) - 4,1437) \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{-0,3935}\right)$
Segunda relación fundamental	$N = \left(\frac{100}{(4,4965 + 0,0221 \cdot H_0 \cdot \sqrt{t_2})}\right)^2$
Tercera relación fundamental	$Dg = -1,632 + 1,2068 \cdot \left(\frac{100}{\sqrt{N}}\right) + 2,1027 \cdot H_{02}$
Cuarta relación fundamental	$V = 3,3914 + 0,4414 \cdot G \cdot H_{02}$
Quinta relación fundamental	$Hm = -0,3398 + 0,9649 \cdot H_{02}$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha, G el área basimétrica en m ² /ha y Hm la altura media en m.	

Con el objetivo de dinamizar este modelo estático, en el presente documento se propone seguir con la metodología propuesta por Calama et al. (2007) a partir del desarrollo de la ecuación de incremento en diámetro de árbol individual para periodos de 5 años. Se construye un modelo dinámico entorno al diámetro cuadrático mediante la aproximación del diámetro del árbol individual al diámetro medio cuadrático (Tabla 43).

Esta variante de modelo dinámico presenta diferencias con respecto al resto de modelos dinámicos presentados aquí. La principal diferencia es que los valores del volumen del rodal siguen siendo dependientes del área basimétrica, pero parten, en primer lugar, de la función de "inicialización" del diámetro cuadrático y conforme se avanza a lo largo del turno y las claras, de la función de "transición" del diámetro medio cuadrático. Es decir, el área basimétrica es función del diámetro cuadrático, ya sea en "inicialización" o en "transición":

$$G_1 = \left(\frac{\pi}{40.000}\right) \cdot (Dg_{IoT})^2 \cdot N \quad (\text{Ec.1}),$$

donde G_1 es el área basimétrica inicial, Dg_{IoT} es el valor del diámetro cuadrático obtenido de la función de "inicialización" o en "transición" (Tabla 43) y N es el valor de la densidad en el momento 1.

Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, Dg_{ext} . Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000}\right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde Dg_1 es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G_2 es el área basimétrica tras la clara y G_1 es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

Por último, para poder reconducir el modelo hacia la obtención del área basimétrica en el momento siguiente al calculado, resulta necesario la obtención del área basimétrica posterior a la clara, de forma que:

$$Dg_{dc} = \sqrt{\frac{G_2}{\left(\frac{\pi}{40000}\right)/N}} \quad (\text{Ec. 5}),$$

$$G_1 = \left(\frac{\pi}{40.000}\right) \cdot (Dg_{dc})^2 \cdot N' \quad (\text{Ec. 6}),$$

donde Dg_{dc} es el diámetro cuadrático en el momento posterior a la clara, G_1 es el área basimétrica en el tiempo siguiente al de la clara, N es la densidad en el momento posterior a la clara y N' es la densidad en el tiempo siguiente al de la clara.

Tabla 43. Funciones empleadas para la variante como modelo dinámico del Pinus pinea. Fuente: Calama et al. (2003) y Calama et al. (2007).

Atributo	Ecuaciones
Índice de sitio	$SI = EXP\left(4,1437 + (\ln(H_0) - 4,1437) \cdot \left(\frac{t}{100}\right)^{-0,3935}\right)$
Altura dominante	$H_{02} = EXP\left(4,1437 + (\ln(H_{01}) - 4,1437) \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{-0,3935}\right)$
Altura media	$Hm = -0,3398 + 0,9649 \cdot H_{02}$
Densidad	$N = \left(\frac{100}{(4,4965 + 0,0221 \cdot H_0 \cdot \sqrt{t_2})}\right)^2$
Diámetro cuadrático ("inicialización")	$Dg = -1,632 + 1,2068 \cdot \left(\frac{100}{\sqrt{N}}\right) + 2,1027 \cdot H_{02}$
Diámetro medio cuadrático ("transición")	$Dg_2 = Dg_1 + \left(\frac{t_2 - t_1}{5}\right) \cdot (EXP(2,2383 - 0,3372 \cdot \ln(Dg_1) - 0,02664 \cdot H_{01} - 0,1516 \cdot \ln(N_1) + 0,0412 \cdot SI + 0,3376) - 1)$
Volumen	$V = 3,3914 + 0,4414 \cdot G \cdot H_{02}$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha, G el área basimétrica en m ² /ha y Hm la altura media en m.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales y la función del diámetro medio cuadrático del modelo estático y su variante dinámica, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de selvicultura a partir del Compendio de Selvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 9). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 100 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 20 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones de los modelos estáticos y dinámicos, se obtiene el valor del volumen del rodal.

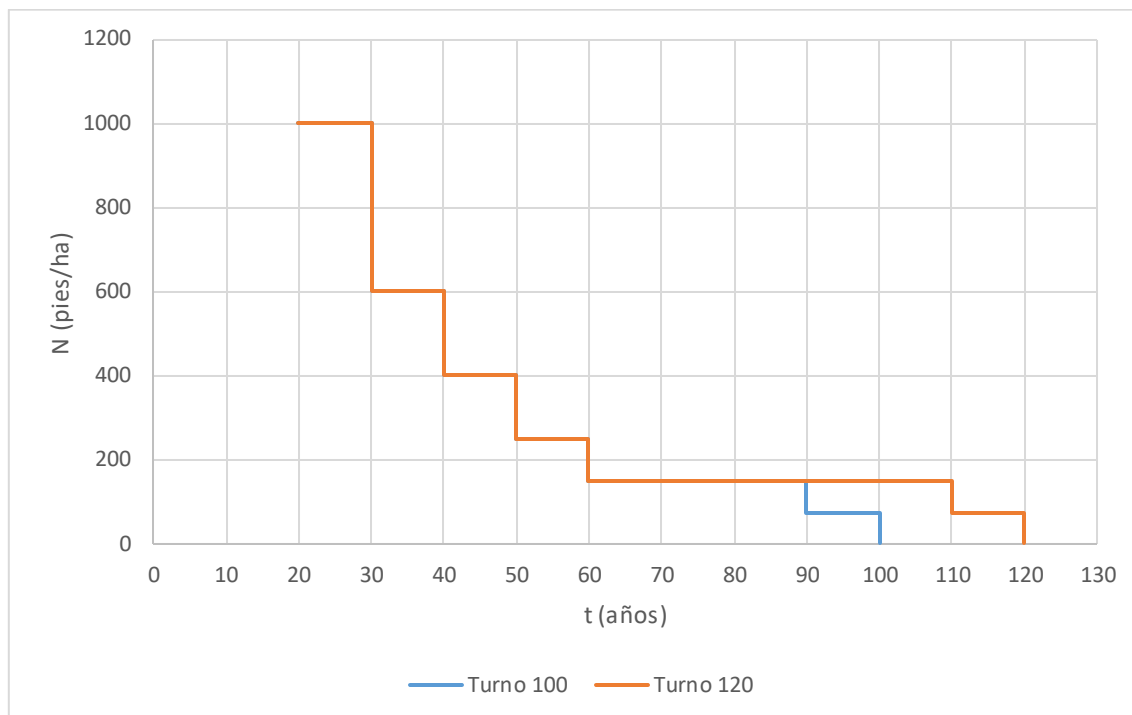


Figura 9. Esquema de claras para *Pinus pinea* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- a) Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_t) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 44) en combinación con Pita (1967) y Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

Tabla 44. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_t \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 5,61 + 3,935 \cdot \left(\frac{Dg^2 \cdot Hm}{100} \right) + 4,21 \cdot \left(\frac{(Dg^2 \cdot Hm)^2}{10^8} \right)$	Pita (1967)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T})$	Menéndez–Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0294 y β_1 es 0,9573.	
Relación de copa	$W_{C-W_T} = \beta_2 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_3}$, donde β_2 es 1,0891 y β_3 es –0,1152.	
Relación raíz–vástago	$R = 0,243$	Ruíz–Peinado et al. (2011)

Atributo	Ecuación	Fuente
Relación raíz-vástago	$R = 0,183$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media, W_{fuste} es la biomasa del fuste, W_{C-W_T} es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.		

b) Metodología 2 (M2). Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 45).

Tabla 45. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T}) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,60625$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_{C-W_T} = \beta_2 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_3}$, donde β_2 es 1,0891 y β_3 es -0,1152.	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Relación raíz-vástago	$R = 0,243$	Ruiz-Peinado et al. (2011)
Relación raíz-vástago	$R = 0,183$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m^3/ha , W_{C-W_T} es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.		

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 7}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (50,8 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa a absorciones de CO_2 para el modelo presentado (Tabla 46):

Tabla 46. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO_2 medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Pinus pinea* según la línea base

establecida por el Compendio de Selvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

	Calama et al. (2003) y Montero et al. (2008) Modelo estático		Calama et al. (2007) Modelo dinámico	
	Metodología 1 (M1)			
Años	100	120	100	120
Biomasa media anual (t)	0,54	0,53	0,46	0,44
Biomasa acumulada anual (t)	1,68	1,55	1,31	1,20
Absorción media anual (t)	1,01	0,99	0,88	0,85
Absorción acumulada anual (t)	3,12	2,89	2,44	2,23
	Metodología 2 (M2)			
Años	100	120	100	120
Biomasa media anual (t)	0,56	0,55	0,47	0,46
Biomasa acumulada anual (t)	1,74	1,63	1,35	1,24
Absorción media anual (t)	1,04	1,03	0,88	0,85
Absorción acumulada anual (t)	3,23	3,03	2,52	2,32
	Especificaciones empleadas para los modelos			
Índice de sitio / edad de referencia (años)	13 / 100		13 / 100	
Densidad inicial (pies/ha)	1000		1000	
Relación raíz–vástago	Ruíz–Peinado et al. (2011)		SEI (2024)	
Esquema de claras	Compendio		Compendio	

6.11. *Pinus radiata*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus radiata*, se desarrollan un modelo estático y un modelo dinámico. Como ejemplo de modelo estático se han empleado las relaciones fundamentales obtenidas de Sánchez et al. (2003) (Tabla 47) a partir de una red de experimentación que consta de 175 parcelas distribuidas mayoritariamente en la provincia de Lugo (120), seguida de A Coruña (51), y de únicamente 4 en la de Pontevedra. En este documento, se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 13, 17, 21 y 25 m.

Tabla 47. Relaciones fundamentales para *Pinus radiata*. El modelo de tabla de producción empleado es el de Sánchez et al. (2003), aunque la primera relación fundamental es obtenida de Diéguez-Aranda et al. (2009). Fuente: Sánchez et al. (2003) y Diéguez-Aranda et al. (2009).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = H_{01} \cdot \left(\frac{1 - \text{EXP}(-0,06738 \cdot t_2)}{1 - \text{EXP}(-0,06738 \cdot t_1)} \right)^{\left(-1,755 + \frac{12,44}{X_0} \right)}$ $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left((\ln(H_{01}) + 1,755 \cdot L_0) + \sqrt{(\ln(H_{01}) + 1,755 \cdot L_0)^2 - 4 \cdot 12,44 \cdot L_0} \right)$ $L_0 = \ln(1 - \text{EXP}(-0,06738 \cdot t_1))$
Segunda relación fundamental	$\ln(N) = 8,69851 - 0,06581 \cdot t_2$
Tercera relación fundamental	$\ln(Dg) = 4,69893 - 0,39612 \cdot \ln(N) + 0,60493 \cdot \ln(H_{02}) - 0,25534 \cdot \ln(H_{01})$
Cuarta relación fundamental	$\ln\left(\frac{V}{G \cdot H_{02}}\right) = 0,26266 - 0,27196 \cdot \ln(H_{02}) + 0,06894 \cdot \ln(Dg)$
Quinta relación fundamental	$H_m = -1,79677 + 0,84463 \cdot H_{02} + 173,96973 \cdot N^{-0,68}$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha, G el área basimétrica en m ² /ha y H_m la altura media en m.	

Como ejemplo de modelo dinámico, las funciones para *Pinus radiata* han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia del modelo desarrollado por Diéguez-Aranda et al. (2009) (Tabla 48). En este documento, se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 11, 16, 21 y 26 m.

Tabla 48. Funciones dinámicas para *Pinus radiata*. El modelo dinámico por el cual se desarrolla la metodología es el contemplado en Diéguez-Aranda et al. (2009). Sin embargo, la altura media es la desarrollada por Sánchez et al. (2003). Fuente: Sánchez et al. (2003) y Diéguez-Aranda et al. (2009).

Atributo	Ecuaciones
Altura dominante	$H_{02} = H_{01} \cdot \left(\frac{1 - \text{EXP}(-0,06738 \cdot t_2)}{1 - \text{EXP}(-0,06738 \cdot t_1)} \right)^{\left(-1,755 + \frac{12,44}{X_0} \right)}$ $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left((\ln(H_{01}) + 1,755 \cdot L_0) + \sqrt{(\ln(H_{01}) + 1,755 \cdot L_0)^2 - 4 \cdot 12,44 \cdot L_0} \right)$ $L_0 = \ln(1 - \text{EXP}(-0,06738 \cdot t_1))$
Altura media	$H_m = -1,79677 + 0,84463 \cdot H_{02} + 173,96973 \cdot N^{-0,68}$
Función de transición del número de pies	$N_2 = \left(N_1^{-0,3161} + 1,053^{(t_2-100)} - 1,053^{(t_1-100)} \right)^{\frac{-1}{0,3161}}$

Atributo	Ecuaciones
Función de inicialización del área basimétrica	$G = -52,23 + 2,676 \cdot t_2 + 1,306 \cdot H_{01} + 0,01008 \cdot N$
Función de transición del área basimétrica	$G_2 = EXP(X_0) \cdot EXP\left(-\left(-276,1 + \frac{1391}{X_0}\right) \cdot t_2^{-0,9233}\right)$ $X_0 = \frac{t_1^{-0,9233}}{2} \cdot \left(-276,1 + t_1^{0,9233} \cdot Ln(G_1) + \sqrt{4 \cdot 1391 \cdot t_1^{0,9233} + (276,1 - t_1^{0,9233} \cdot Ln(G_1))^2}\right)$
Volumen	$V = (G \cdot H_{02})^{0,9987 - 0,002232 \cdot t_2} \cdot EXP(-0,9635 + 0,011703 \cdot t_2)$
donde N es el número de pies por hectárea, H ₀₂ la altura dominante en m, H ₀₁ es la calidad de estación, Hm es la altura media en m, t ₂ es la edad en años, t ₁ es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m ² /ha, G ₂ es el área basimétrica en m ² /ha en t ₂ obtenida en función del G ₁ en t ₁ , N ₂ representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N ₁ , V el volumen en m ³ /ha y Hm es la altura media en m.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático y las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de selvicultura a partir del Compendio de Selvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 10). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 40 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 10 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones del modelo estático y dinámico, se obtiene el valor del volumen del rodal.

Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, Dg_{ext}. Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.1}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000}\right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

donde Dg₁ es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G₂ es el área basimétrica tras la clara y G₁ es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

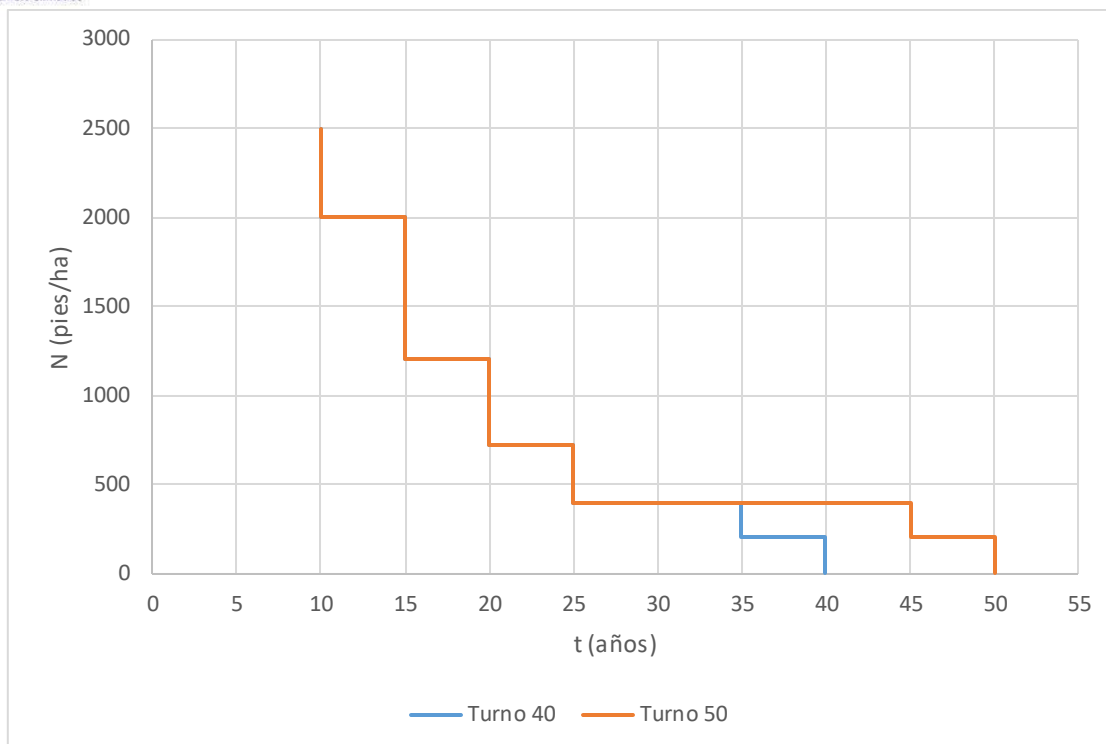


Figura 10. Esquema de claras para *Pinus radiata* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_T) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez-Miguélez et al. (2021) (Tabla 49) en combinación con HAZI Fundazioa y SEI (2024).

Tabla 49. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = EXP(-3,01274 + 1,86004 \cdot \ln(Dg) + 1,01738 \cdot \ln(Hm))$	HAZI Fundazioa
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0337 y β_1 es 0,9239.	
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,1129$	
Relación raíz-vástago	$R = 0,274$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en m, W_{fuste} es la biomasa del fuste, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

b) **Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 50).

Tabla 50. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C - W_T) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,441$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_C - W_T = 0,1129$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Relación raíz-vástago	$R = 0,274$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m ³ /ha, $W_C - W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.		

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (49,7 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO₂ siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO₂ junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO₂ para los modelos presentados (Tabla 51):

Tabla 51. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el cómputo de los modelos definidos para Pinus radiata según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

	Sánchez et al. (2003) <i>Modelo estático</i>		Diéguez–Aranda et al. (2009) <i>Modelo estático</i>	
	Metodología 1 (M1)			
Años	40	50	40	50
Biomasa media anual (t)	6,93	6,36	4,25	4,00
Biomasa acumulada anual (t)	14,09	12,32	12,92	11,33
Absorción media anual (t)	12,62	11,59	7,74	7,28
Absorción acumulada anual (t)	25,67	22,45	23,55	20,65
	Metodología 2 (M2)			
Años	40	50	40	50
Biomasa media anual (t)	5,02	4,65	3,10	2,96
Biomasa acumulada anual (t)	10,32	9,09	9,53	8,41
Absorción media anual (t)	9,14	8,47	5,66	5,39
Absorción acumulada anual (t)	18,81	16,56	17,37	15,32
	Especificaciones empleadas para los modelos			
Índice de sitio / edad de referencia (años)	17 / 20		21 / 20	
Densidad inicial (pies/ha)	2500		2500	
Relación raíz–vástago	SEI (2024)		SEI (2024)	
Esquema de claras	Compendio		Compendio	

6.12. *Pinus sylvestris*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pinus sylvestris*, se desarrollan un modelo estático y dos modelos dinámicos. Como ejemplo de modelo estático se han empleado las relaciones fundamentales obtenidas de del Río et al. (2006) (Tabla 52). Las relaciones fundamentales para del Río et al. (2006) han sido obtenidas del inventario de Castilla y León en el cual se describen repoblaciones forestales para esta especie. En este documento, se define una edad de referencia de 50 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 12, 15, 18, 21 y 24 m.

Tabla 52. Relaciones fundamentales para *Pinus sylvestris*. Fuente: del Río et al. (2006).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = \frac{40,3331}{1 - \left(1 - \frac{40,331}{H_{01}}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,5003}}$
Segunda relación fundamental	$\ln(N) = 8,32245 - 0,67721 \cdot \ln(H_{02})$
Tercera relación fundamental	$\ln(Dg) = 4,36156 - 0,35953 \cdot \ln(N) + 0,41028 \cdot \ln(H_{02})$
Cuarta relación fundamental	$\ln(V) = -0,64154 + 1,02361 \cdot \ln(G) + 0,90067 \cdot \ln(H_{02})$
Quinta relación fundamental	$Hm = 0,95646 \cdot H_{02}$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha, G el área basimétrica en m ² /ha y Hm la altura media en m	

Como ejemplo de modelo dinámico, las funciones para *Pinus sylvestris* han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia del modelo desarrollado por Diéguez-Aranda et al. (2009) (Tabla 53.A). En este documento, se define una edad de referencia de 40 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 5, 10, 15 y 20 m. Por otro lado, también como ejemplo, se ha seleccionado el modelo desarrollado por del Río (1999) a partir de un inventario de repoblaciones forestales para la especie (Tabla 53.B). Este, fija una edad de referencia de 100 años y una calidad de estación de 29 m.

Tabla 53. Funciones dinámicas para *Pinus sylvestris*. Fuente: del Río et al. (1999) y Diéguez-Aranda et al. (2009).

A)	Diéguez-Aranda et al. (2009)
Altura dominante	$H_{02} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{H_{01}}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,277}}$
Altura media	$Hm = -1,155649 + 0,976772 \cdot H_{02} \text{ (del Río, 1999)}$
Función de transición del número de pies	$N_2 = (N_1^{-1,590} + 1,138 \cdot 10^{-12} \cdot H_{01} \cdot (t_2^{3,308} - t_1^{3,308}))^{\frac{-1}{1,590}}$
Función de inicialización del área basimétrica	$G = 92,40 \cdot EXP\left(-\left(\frac{1593}{H_{01}}\right) \cdot t_2^{-1,369}\right)$
Función de transición del área basimétrica	$G_2 = 92,40 \cdot \left(\frac{G_1}{92,40}\right)^{\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,369}}$
Volumen	$V = 0,5908 \cdot G^{0,9981} \cdot H_{02}^{0,8844}$
B)	del Río (1999)
Altura dominante	$H_{02} = \left(3,1827 \cdot \left(1 - EXP\left(-3,431 \cdot \frac{t_2}{100}\right)\right)^{\frac{1}{0,3536}}\right) \cdot 10$
Altura media	$Hm = -1,155649 + 0,976772 \cdot H_{02}$
Función de transición del número de pies	$N_2 = \left(N_1^{-2,349350607} + 9,9 \cdot 10^{-08} \cdot \left[\left(\frac{t_2}{100}\right)^{4,873897659} - \left(\frac{t_1}{100}\right)^{4,873897659}\right]\right)^{\frac{1}{-2,349350607}}$
Función de inicialización del área basimétrica	$G = 92,40 \cdot EXP\left(-\left(\frac{1593}{H_{01}}\right) \cdot t_2^{-1,369}\right) \text{ (Diéguez-Aranda et al., 2009)}$
Función de transición del área basimétrica	$G_2 = G_1^{\frac{t_1}{t_2}} \cdot EXP\left(5,103222 \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right)\right)$
Volumen	$V = EXP\left(1,427060 + 0,388317 \cdot \frac{H_{02}}{10} + \frac{-30,691629}{t_2} + 1,034549 \cdot Ln(G)\right)$
donde N es el número de pies por hectárea, H ₀₂ la altura dominante en m, H ₀₁ es la calidad de estación, Hm es la altura media en m, t ₂ es la edad en años, t ₁ es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m ² /ha, G ₂ es el área basimétrica en m ² /ha en t ₂ obtenida en función del G ₁ en t ₁ , N ₂ representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N ₁ , V el volumen en m ³ /ha y Hm es la altura media en m.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático y las funciones para los modelos dinámicos, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de silvicultura a partir del Compendio de Silvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 11). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 120 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 20 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones fundamentales de los modelos estáticos y dinámicos, se obtiene el valor del volumen del rodal.

Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, Dg_{ext} . Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.1}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000} \right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

donde Dg_1 es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G_2 es el área basimétrica tras la clara y G_1 es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

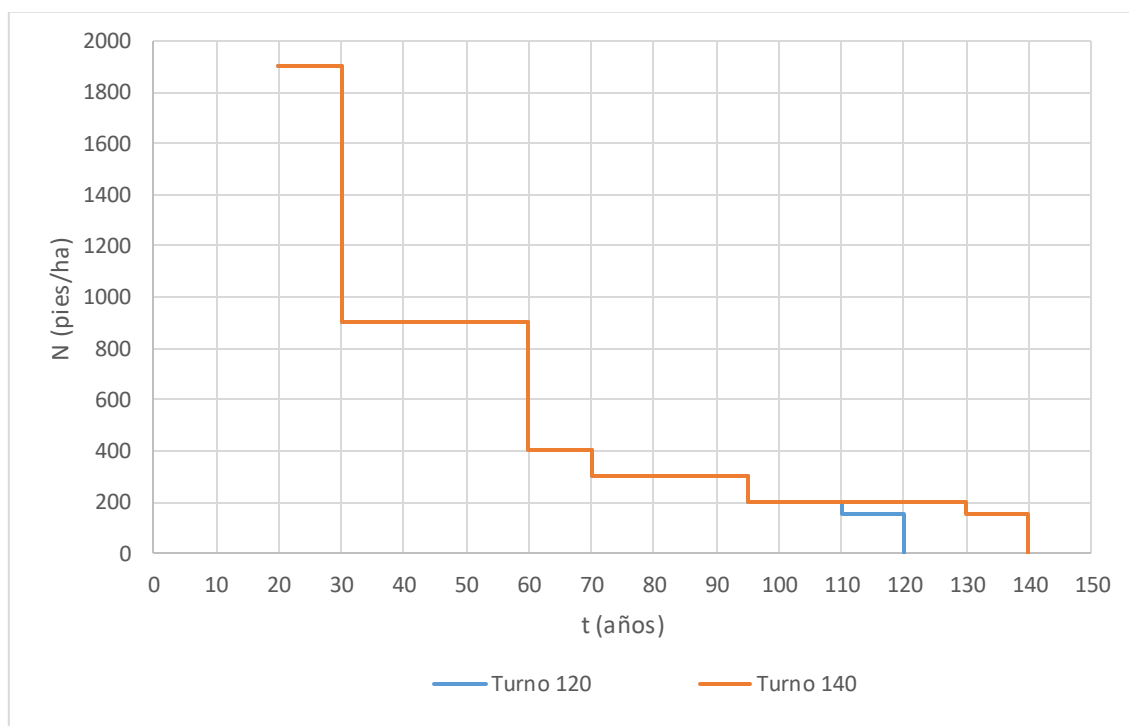


Figura 11. Esquema de claras para *Pinus sylvestris* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de

la biomasa total (W_T) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 54) en combinación con Pita (1967) y Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024).

Tabla 54. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = -1,26 + 4,076 \cdot \left(\frac{Dg}{10}\right)^2 \cdot Hm - 0,001344 \cdot \left(\left(\frac{Dg}{10}\right)^2 \cdot Hm\right)^2$	Pita (1967)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T})$	Menéndez–Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0160 y β_1 es 0,9948	
Relación de copa	$W_{C-W_T} = \beta_2 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_3}$, donde β_2 es 1,5553 y β_3 es –0,1831	
Relación raíz–vástago	$R = 0,279$	Ruiz–Peinado et al. (2011)
Relación raíz–vástago	$R = 0,272$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en, W_{fuste} es la biomasa del fuste, W_{C-W_T} es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.

b) Metodología 2 (M2). Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz–vástago de Ruíz–Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 55).

Tabla 55. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T}) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,467$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_{C-W_T} = \beta_2 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_3}$, donde β_2 es 1,5553 y β_3 es –0,1831	Menéndez–Miguélez et al. (2021)
Relación raíz–vástago	$R = 0,279$	Ruiz–Peinado et al. (2011)
Relación raíz–vástago	$R = 0,272$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m^3/ha , W_{C-W_T} es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (50,9 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO_2 para los modelos presentados (Tabla 56):

Tabla 56. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO_2 medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el cómputo de los modelos definidos para Pinus sylvestris según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

	del Río et al. (2006) <i>Modelo estático</i>		del Río (1999) <i>Modelo dinámico</i>		Diéguez–Aranda et al. (2009) <i>Modelo dinámico</i>	
	Metodología 1 (M1)					
Años	120	140	120	140	120	140
Biomasa media anual (t)	1,79	1,68	2,18	2,12	1,67	1,62
Biomasa acumulada anual (t)	3,73	3,50	6,49	6,41	4,89	4,81
Absorción media anual (t)	3,34	3,13	4,07	3,95	3,12	3,02
Absorción acumulada anual (t)	6,96	6,53	12,12	11,97	9,13	8,98
	Metodología 2 (M2)					
Años	120	140	120	140	120	140
Biomasa media anual (t)	1,62	1,48	2,71	2,48	2,18	2,01
Biomasa acumulada anual (t)	3,36	3,04	7,62	6,99	6,06	5,60
Absorción media anual (t)	3,03	2,76	5,07	4,63	4,06	3,75
Absorción acumulada anual (t)	6,28	5,68	14,22	13,05	11,31	10,46
	Especificaciones empleadas por los modelos					
Índice de sitio / edad de referencia (años)	18 / 50		29 / 100		29 / 100	
Densidad inicial (pies/ha)	1900		1200		1200	
Relación raíz–vástago	Ruíz–Peinado et al. (2011)		Ruíz–Peinado et al. (2011)		Ruíz–Peinado et al. (2011)	
Esquema de claras	Compendio		Compendio		Compendio	

6.13. *Populus x americana*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Populus canadensis* se desarrolla un modelo dinámico. El modelo empleado es el desarrollado por Barrio–Anta et al. (2008) cuyos datos provienen de las mediciones realizadas en 198 parcelas experimentales del INIA en las regiones de Castilla y León y Madrid a comienzos de los años 70 (Tabla 57). En este documento, se define una edad de referencia de 8 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 10, 14, 18 y 22 m.

Tabla 57. Funciones dinámicas para el *Populus x americana*. Fuente: Barrio–Anta et al. (2008).

Atributo	Ecuaciones
Altura media	$Hm = 39,275 \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{IS}{39,275} \right)^{1/2,6389} \right)^{t/t_0} \right)^{2,6389}$
Función de inicialización del área basimétrica	$G = \frac{12,944 + X_0}{1 + \left(\frac{3242,1}{X_0} \right) \cdot t^{-2,6389}}$ $X_0 = 1/2 \cdot \left(IS - 12,944 + \sqrt{(IS - 12,944)^2 + 4 \cdot 3242,1 \cdot IS \cdot t_0^{-2,6389}} \right)$
Función de transición del área basimétrica	$G_2 = \frac{12,944 + X_0}{1 + \left(\frac{3242,1}{X_0} \right) \cdot t_2^{-2,6389}}$ $X_0 = 1/2 \cdot \left(G_1 - 12,944 + \sqrt{(G_1 - 12,944)^2 + 4 \cdot 3242,1 \cdot G_1 \cdot t_1^{-2,6389}} \right)$
Volumen	$V = 0,36281 \cdot G^{0,97834} \cdot Hm^{1,0506}$
donde Hm la altura media en m, t es la edad en años, t ₀ es la edad de referencia en años, t ₁ es la edad de referencia en años en el momento 1, t ₂ es la edad de referencia en años en el momento 2, IS es el índice de sitio, G ₁ el área basimétrica en m ² /ha en el momento t ₁ , G ₂ el área basimétrica en m ² /ha en el momento t ₂ V el volumen en m ³ /ha y G el área basimétrica en m ² /ha.	

Una vez definidas las funciones del modelo dinámico, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, dado el rápido crecimiento de la especie, se propone una gestión sin claras con una única corta final a los 16 años partiendo de una densidad inicial a los 4 años de edad de la masa de 300 pies/ha. Esta corta será comparada con un alargamiento del turno final de corta de 4 años.

Tras la aplicación de las relaciones fundamentales del modelo dinámico, se obtiene el valor del volumen del rodal.

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (Wt) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (Vu) (Rodríguez et al. 2015) y la biomasa del árbol medio (Wu) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media) (Menéndez–Miguélez et al. 2021) en combinación con Ruíz–Peinado et al. (2012) y SEI (2024) (Tabla 58).

Tabla 58. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T (t \text{ M.S.}) = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,044 \cdot Dg^{1,872438} \cdot H^{1,0223328}$	Rodríguez et al. (2015)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T})$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0337 y β_1 es 0,9153.	
Relación de copa	$W_{C-W_T} = 0,259$	
Relación raíz-vástago	$R = 0,363$	Ruíz-Peinado et al. (2012)
Relación raíz-vástago	$R = 0,536$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m³/ha, BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, H es la altura en m, Hm es la altura media en m, W_{fuste} es la biomasa del fuste, W_{C-W_T} es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

b) Metodología 2 (M2). Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de Ruíz-Peinado et al. (2011) o SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 59).

Tabla 59. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T (t \text{ M.S.}) = W_{fuste} / (1 - W_{C-W_T}) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,413$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_{C-W_T} = 0,259$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Relación raíz-vástago	$R = 0,363$	Ruíz-Peinado et al. (2012)
Relación raíz-vástago	$R = 0,536$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{12\%}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m³/ha, W_{C-W_T} es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (50,0 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO_2 para el modelo presentado (Tabla 60):

*Tabla 60. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO_2 medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo dinámico de *Populus x americana* según su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las metodologías de cálculo de biomasa propuesta.*

		Barrio–Anta et al. (2008)	
		Modelo dinámico	
		Metodología 1 (M1)	
	Años	16	20
Biomasa media anual (t)		4,31	7,57
Biomasa acumulada anual (t)		14,96	25,61
Absorción media anual (t)		7,89	13,88
Absorción acumulada anual (t)		27,42	46,96
		Metodología 2 (M2)	
	Años	16	20
Biomasa media anual (t)		3,11	5,64
Biomasa acumulada anual (t)		11,08	19,51
Absorción media anual (t)		5,70	10,35
Absorción acumulada anual (t)		20,31	35,77
Especificaciones empleadas por el modelo			
Índice de sitio / edad de referencia (años)		14 / 8	
Densidad inicial (pies/ha)		300	
Relación raíz–vástago		Ruíz–Peinado et al. (2012)	
Esquema de claras		Sin claras	

6.14. *Pseudotsuga menziesii*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Pseudotsuga menziesii*, se desarrolla un modelo estático. Las relaciones fundamentales han sido obtenidas de López-Sánchez (2009) (Tabla 61). Las relaciones fundamentales para López-Sánchez (2009) se desarrollan a partir del inventario del norte y noroeste de España para repoblaciones forestales de esta especie. En este documento, se define una edad de referencia de 20 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 9, 13, 17 y 21 m.

Tabla 61. Relaciones fundamentales para *Pseudotsuga menziesii*. La quinta relación fundamental ha sido obtenida a partir de datos propios del ICIFOR, INIA – CSIC medidos en parcelas de la especie en el País Vasco. Fuente: López-Sánchez (2009).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = H_{01} \cdot \left(\frac{1 - EXP(-0,05221 \cdot t_2)}{1 - EXP(-0,05221 \cdot t_1)} \right)^{-9,568 + \left(\frac{40,49}{X_0} \right)}$ $X_0 = \frac{\ln(H_{01}) + 9,568 \cdot L_0 + \sqrt{(\ln(H_{01}) + 9,568 \cdot L_0)^2 - 4 \cdot 40,49 \cdot L_0}}{2}$ $L_0 = \ln(1 - EXP(-0,05221 \cdot t_1))$
Segunda relación fundamental	$N = \left(\frac{10.000}{t_1 \cdot H_{02}} \right)^2$
Tercera relación fundamental	$Dg = 22,83 \cdot N^{-0,2915} \cdot H_{02}^{0,6720}$
Cuarta relación fundamental	$V = 5,599 \cdot 10^{-5} \cdot Dg^{2,047} \cdot H_{02}^{0,7592} \cdot N^{1,002}$
Quinta relación fundamental	$Hm = 0,8808 \cdot H_{02} - 0,6974$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha y Hm la altura media en m.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de silvicultura a partir del Compendio de Silvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 12). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 40 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 10 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones fundamentales del modelo estático, se obtiene el valor del volumen del rodal.

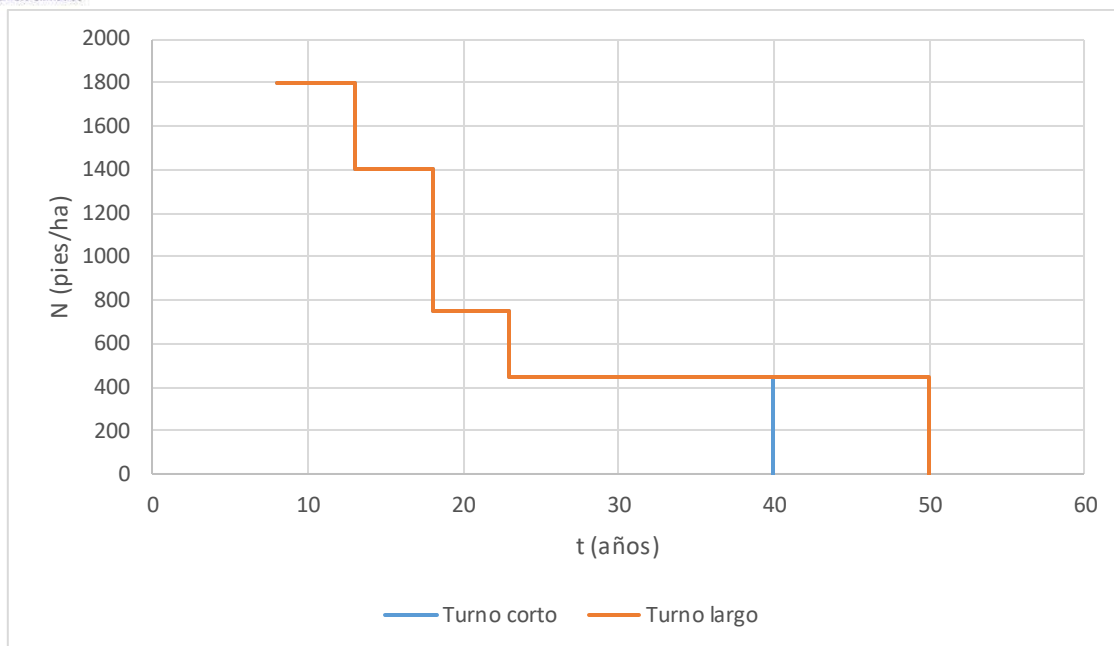


Figura 12. Esquema de claras para *Pseudotsuga menziesii* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen la siguiente metodología:

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_T) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) (García-Sánchez et al. 1996) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media) (González-Gaarslev et al. 2025) en combinación con SEI (2024) (Tabla 62).

Tabla 62. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,08004 \cdot Dg^{1,8193} \cdot Hm^{0,9405}$	García-Sánchez et al. (1996)
Biomasa árbol unitario	$W_u = EXP(-6,6292 + 2,669 \cdot \ln(Dg)) + EXP(-6,9137 + 2,9506 \cdot \ln(Dg)) + EXP(-3,77 + 2,2783 \cdot \ln(Dg)) + EXP(-2,0079 + 2,776 \cdot \ln(Dg))$	González-Gaarslev et al. (2025)
Relación raíz-vástago	$R = 0,387$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en, W_{fuste} es la biomasa del fuste, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 1}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (50,9 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO_2 para el modelo presentado (Tabla 63):

*Tabla 63. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO_2 medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de *Pseudotsuga menziesii* según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de la metodología de cálculo de biomasa propuesta.*

	López-Sánchez (2009)	
	Modelo estático	
	Metodología 1 (M1)	
Años	40	50
Biomasa media anual (t)	4,46	4,19
Biomasa acumulada anual (t)	9,33	8,77
Absorción media anual (t)	8,32	7,82
Absorción acumulada anual (t)	17,42	16,36
Especificaciones empleadas por el modelo		
Índice de sitio / edad de referencia (años)	13 / 20	
Densidad inicial (pies/ha)	1800	
Relación raíz-vástago	SEI (2024)	
Esquema de claras	Compendio	

6.15. *Quercus pyrenaica*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Quercus pyrenaica*, se desarrolla un modelo estático. Las relaciones fundamentales han sido obtenidas de Castaño – Santamaría (2013) (Tabla 64). Las relaciones fundamentales para Castaño – Santamaría (2013) han sido obtenidas del inventario del Sistema Ibérico para repoblaciones forestales de esta especie. En este documento, se define una edad de referencia de 60 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 7, 10, 13 y 16 m.

Tabla 64. Relaciones fundamentales para *Quercus pyrenaica*. El modelo es el contemplado por Castaño – Santamaría (2013), mientras que la primera relación fundamental viene dada por Adame et al. (2006). Fuente: Adame et al. (2006) y Castaño – Santamaría (2013).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = EXP(X) \cdot t_2^{15,172-4,2126 \cdot X}$ $X = - \left(\frac{(-\ln(H_{01}) + 15,172 \cdot \ln(t_1'))}{(1 - 4,2126 \cdot \ln(t_1'))} \right)$ $t_1' = 1 - EXP(-0,1439 \cdot t_1^{0,6711})$ $t_2' = 1 - EXP(-0,1439 \cdot t_2^{0,6711})$
Segunda relación fundamental	–
Tercera relación fundamental	$Dg = 14,4008 \cdot N^{-0,3024} \cdot H_{02}^{0,8473}$
Cuarta relación fundamental	$V = 2,16 \cdot 10^{-4} \cdot Dg^{1,4412} \cdot H_{02}^{1,0690} \cdot N^{0,9068}$
Quinta relación fundamental	–
donde N es el número de pies por hectárea, H ₀₂ la altura dominante en m, H ₀₁ es la calidad de estación, t ₂ es la edad en años, t ₁ es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm y V el volumen en m ³ /ha.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de silvicultura a partir del Compendio de Silvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 13). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 35 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 5 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones fundamentales del modelo estático, se obtiene el valor del volumen del rodal.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

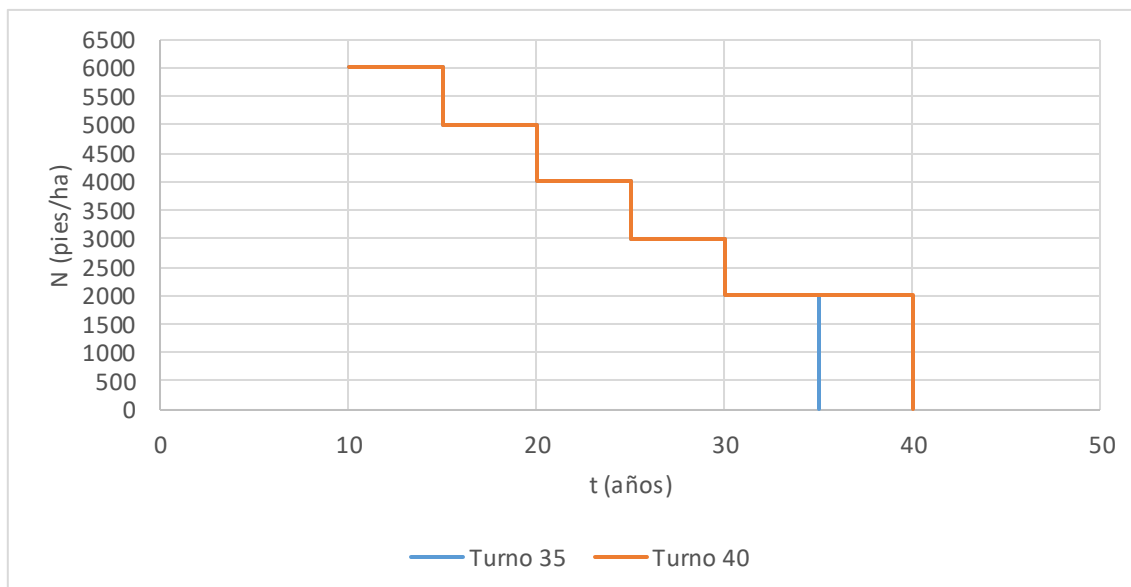


Figura 13. Esquema de claras para *Quercus pyrenaica* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- a) **Metodología Castaño – Santamaría (MC-S).** Se obtiene la ecuación de biomasa total (W_t) a partir de la altura dominante (H_{02}), densidad (N) y diámetro cuadrático (D_g) (Tabla 65).

Tabla 65. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T (t \text{ M.S.}) = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot D_g^{2,2209} \cdot H_{02}^{0,8317} \cdot N^{0,9744} \cdot (1 + R)$	Castaño–Santamaría (2013)
Relación raíz–vástago	$R = 0,353$	Ruíz–Peinado et al. (2012)
Relación raíz–vástago	$R = 0,300$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, D_g es el diámetro cuadrático, H_m es la altura media en, W_{fuste} es la biomasa del fuste, W_C/W_T es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.

- b) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_t) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) (Rodríguez et al., 2015) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media) combinación con SEI (2024) o Ruíz–Peinado et al. (2012) (Tabla 66).

Tabla 66. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
BEF	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,051 \cdot Dg^{1,867810} \cdot H_{02}^{0,989625}$	Rodríguez et al. (2015)
Biomasa árbol unitario	$W_u = 0,0074 \cdot (Dg^2 \cdot H_{02})^{1,1616}$	Datos sin publicar
Relación raíz-vástago	$R = 0,353$	Ruíz-Peinado et al. (2012)
Relación raíz-vástago	$R = 0,300$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m ³ /ha, BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en, W_{fuste} es la biomasa del fuste, W_C es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.		

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 1}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (47,5 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO₂ siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO₂ junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa a absorciones de CO₂ para el modelo presentado (Tabla 67):

Tabla 67. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el modelo estático de Quercus pyrenaica según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

		Castaño–Santamaría (2013)	
		Modelo estático	
		Metodología Castaño–Santamaría (MC–S)	
	Años	35	40
Biomasa media anual (t)		0,54	0,57
Biomasa acumulada anual (t)		1,48	1,69
Absorción media anual (t)		0,94	0,99
Absorción acumulada anual (t)		2,59	2,94
		Metodología 1 (M1)	
	Años	35	40
Biomasa media anual (t)		0,90	0,90
Biomasa acumulada anual (t)		2,12	2,28
Absorción media anual (t)		1,57	1,57
Absorción acumulada anual (t)		3,69	3,97
Especificaciones empleadas por el modelo			
Índice de sitio / edad de referencia (años)		13 / 60	
Densidad inicial (pies/ha)		6000	
Relación raíz–vástago		Ruíz–Peinado et al. (2012)	
Esquema de claras		Compendio	

6.16. *Quercus robur*

Para la estimación del volumen a lo largo del ciclo para *Quercus robur* se desarrollan un modelo estático y un modelo dinámico. Como ejemplo de modelo estático se han empleado las relaciones fundamentales obtenidas de Diéguez–Aranda et al. (2009) (Tabla 68). Las relaciones fundamentales para Diéguez–Aranda et al. (2009) han sido obtenidas del inventario de Galicia para repoblaciones forestales de esta especie. En este documento, se define una edad de referencia de 60 años y se han fijado tres calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 10, 15 y 20 m.

Tabla 68. Relaciones fundamentales para *Quercus robur*. Fuente: Diéguez–Aranda et al. (2009).

Atributo	Ecuaciones
Primera relación fundamental	$H_{02} = 129 \cdot \left(\frac{H_{01}}{129} \right)^{\left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{0,3019}}$
Segunda relación fundamental	$N = 1,030 \cdot EXP(12,59) \cdot H_{02}^{-2,007}; \text{ parcelas de alta densidad}$ $N = 1,019 \cdot EXP(11,33) \cdot H_{02}^{-1,782}; \text{ parcelas de baja densidad}$
Tercera relación fundamental	$Dg = 33,66 \cdot N^{-0,3307} \cdot H_{02}^{0,6185}$
Cuarta relación fundamental	$V = 6,733 \cdot 10^{-5} \cdot Dg^{1,872} \cdot H_{02}^{0,9039} \cdot N$
Quinta relación fundamental	$Hm = -29,49 + 0,8407 \cdot H_{02} + \frac{36,34}{N^{0,03}}$
donde N es el número de pies por hectárea, H_{02} la altura dominante en m, H_{01} es la calidad de estación, t_2 es la edad en años, t_1 es la edad de referencia en años, Dg el diámetro medio cuadrático en cm, V el volumen en m ³ /ha y Hm la altura media en m.	

Como ejemplo de modelo dinámico, las funciones para *Quercus robur* han sido obtenidas a partir de inventario de repoblaciones forestales para esta especie en Galicia del modelo desarrollado por Diéguez–Aranda et al. (2009) (Tabla 69). En este documento, se define una edad de referencia de 60 años y se han fijado cuatro calidades de estación correspondientes a los índices de sitio de 8, 13, 18 y 23 m.

Tabla 69. Funciones dinámicas para *Quercus robur*. Fuente: Diéguez–Aranda et al. (2009).

Atributo	Ecuaciones
Altura dominante	$H_{02} = H_{01} \left(\frac{1 - EXP(-0,01440 \cdot t_2)}{1 - EXP(-0,01440 \cdot t_1)} \right)^{-1,049 + \frac{7,479}{X_0}}$ $X_0 = 0,5 \left(\ln(H_{01}) + 1,049 \cdot L_0 + \sqrt{(\ln(H_{01}) + 1,049 \cdot L_0)^2 - 29,92 \cdot L_0} \right)$ $L_0 = \ln(1 - EXP(-0,01440 \cdot t_1))$
Altura media	$Hm = -29,49 + 0,8407 \cdot H_{02} + \frac{36,34}{N^{0,03}}$
Función de transición del número de pies	$N_2 = (N_1 \cdot EXP(-0,01533 \cdot (t_2 - t_1)))$
Función de inicialización del área basimétrica	$G = 104,8 \cdot (1 - EXP(-0,006031 \cdot t_2))^{\frac{14,62}{H_{01}} + \frac{167,1}{N_2}}$
Función de transición del área basimétrica	$G_2 = G_1^{\frac{t_1}{t_2}} \cdot EXP\left(0,8579 \cdot \ln(H_{01}) \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) + 0,3060 \cdot \ln(N_1) \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right)\right)$

Atributo	Ecuaciones
Volumen	$V = 5,030 \cdot 10^{-5} \cdot Dg^{1,974} \cdot H_{02}^{0,9243} \cdot N^{0,9752}$
donde N es el número de pies por hectárea, H ₀₂ la altura dominante en m, H ₀₁ es la calidad de estación, Hm es la altura media en m, t ₂ es la edad en años, t ₁ es la edad de referencia en años, G el área basimétrica en m ² /ha, G ₂ es el área basimétrica en m ² /ha en t ₂ obtenida en función del G ₁ en t ₁ , N ₂ representa la mortalidad natural de la masa en pies/ha obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior N ₁ , V el volumen en m ³ /ha y Hm es la altura media en m.	

Una vez definidas las relaciones fundamentales del modelo estático y las funciones para el modelo dinámico, resulta necesario conocer y definir la línea base para realizar una correcta estimación del C fijado mediante la gestión tradicional de la masa. En el presente documento y ante el desconocimiento de la gestión de los particulares, se propone la definición del régimen de selvicultura a partir del Compendio de Selvicultura de España (Serrada et al., 2008) (Figura 14). La estimación del C fijado por la línea base, con turno de 140 años, será comparado con un alargamiento del turno final de corta de 20 años. Este régimen de claras podrá ser utilizado por los órganos gestores en el caso de que los tratamientos no se hayan iniciado ante masas jóvenes. No obstante, las herramientas de cálculo quedarán diseñadas para poder incorporar otros esquemas de claras y otros turnos de corta final.

Tras la aplicación del régimen de claras definido y la aplicación de las relaciones del modelos estático y dinámico, se obtiene el valor del volumen del rodal.

Una particularidad de los modelos dinámicos a la hora de la simulación del efecto de las claras es que los valores de volumen del rodal suelen ser dependientes del área basimétrica. Para calcular el área basimétrica en el momento posterior a la clara, resulta necesario obtener en primer lugar el diámetro cuadrático de la masa que se va a extraer, Dg_{ext} . Para ello, en este documento, se propone la realización de claras bajas, de forma que:

$$Dg_{ext} = Dg_1 \cdot 0,9 \quad (\text{Ec.1}),$$

$$G_{ext} = \left(\frac{\pi}{40.000} \right) \cdot (Dg_{ext})^2 \cdot N_{ext} \quad (\text{Ec.2}),$$

$$G_2 = G_1 - G_{ext} \quad (\text{Ec.3}),$$

donde Dg_1 es el diámetro cuadrático en el momento anterior a la clara, 0,9 es el factor empleado para definir el peso la clara (clara baja), G_{ext} es el área basimétrica extraída, N_{ext} es la densidad extraída tras la clara, G_2 es el área basimétrica tras la clara y G_1 es el área basimétrica en el momento antes de la clara.

El factor definitorio del peso de la clara puede ser modificado por el órgano gestor responsable para su adecuación al régimen de claras establecido, adoptando otros valores. En ciertas ocasiones, la intensidad de la clara queda definida por una ecuación del modelo.

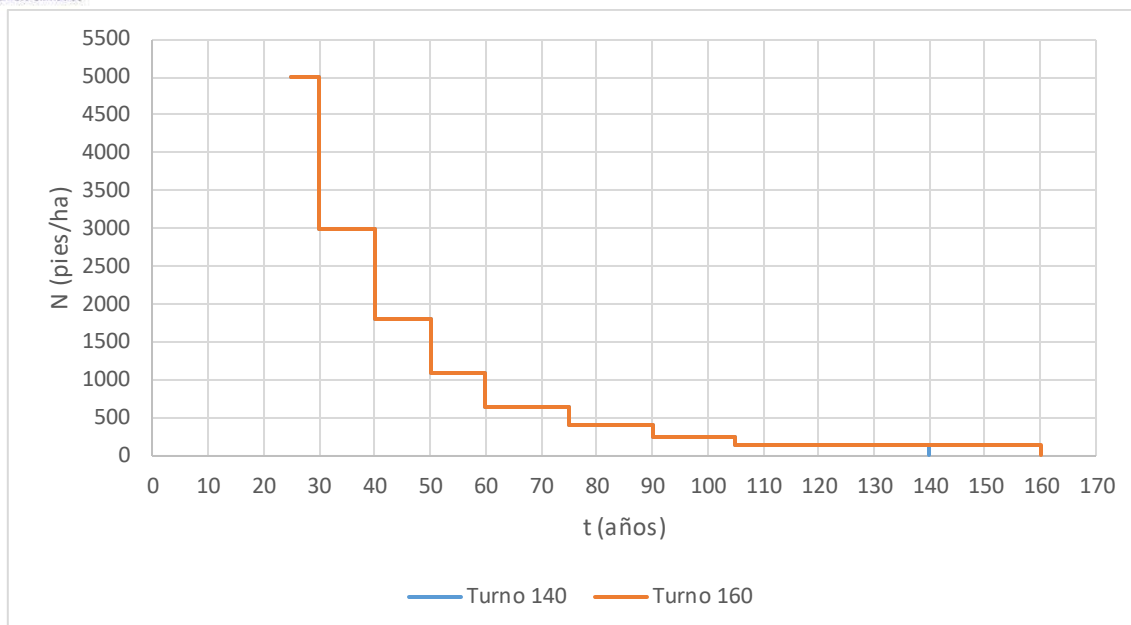


Figura 14. Esquema de claras para *Quercus robur* en el que queda indicado el turno de la línea base (azul) y el alargamiento del turno (naranja). Fuente: Serrada et al. (2008).

El siguiente paso es la conversión de volumen total del rodal a biomasa. Para ello, en el presente documento se proponen dos metodologías:

- a) **Metodología 1 (M1).** Se obtiene de la relación entre el volumen maderable y la biomasa a partir de los factores de expansión de biomasa (BEF) para el cálculo de la biomasa total (W_T) a partir del volumen total (V). La propuesta es calcular el volumen del árbol (V_u) y la biomasa del árbol medio (W_u) (árbol de diámetro medio cuadrático y altura media). Se emplea la metodología desarrollada por Menéndez–Miguélez et al. (2021) (Tabla 70) en combinación con SEI (2024).

Tabla 70. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 1ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz–vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = BEF \cdot V \cdot (1 + R)$	–
Factor expansión biomasa	$BEF = W_u / V_u$	–
Volumen individual	$V_u = 0,066964 \cdot Dg^{2,0372} \cdot Hm^{0,70403}$	Martínez–Millán et al. (1993)
Biomasa árbol unitario	$W_u = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T)$	Menéndez–Miguélez et al. (2021)
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = \beta_0 \cdot (Dg^2 \cdot Hm)^{\beta_1}$, donde β_0 es 0,0366 y β_1 es 0,9365	
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,4268$	
Relación raíz–vástago	$R = 0,536$	SEI (2024)

donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, V es el volumen del rodal en m^3/ha , BEF es el factor de expansión de biomasa, V_u es el volumen de árbol individual, W_u es la biomasa del árbol unitario, Dg es el diámetro cuadrático, Hm es la altura media en, W_{fuste} es la biomasa del fuste, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz–vástago.

- b) **Metodología 2 (M2).** Se obtiene la biomasa total a partir de la transformación del volumen total de fuste en biomasa total de fuste, aplicando un factor de densidad de la madera a humedad al 12 % tabulado por especies (Gutiérrez Oliva y Plaza

Pulgar, 1967), aplicando la corrección de Vieilledent et al. (2018) para reducir la densidad a humedad al 0 % e incorporando el coeficiente raíz-vástago de SEI (2024). El factor de densidad de madera es obtenido como la media de los factores por provincia (Tabla 71).

Tabla 71. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la biomasa total para la 2ª Metodología. Se proponen dos relaciones raíz-vástago. El órgano evaluador deberá seleccionar una de ellas.

Atributo	Ecuación	Fuente
Biomasa total	$W_T \text{ (t M.S.)} = W_{fuste} / (1 - W_C \cdot W_T) \cdot (1 + R)$	–
Biomasa de fuste	$W_{fuste} = (d_{12\%} \cdot 0,828) \cdot V$	Vieilledent et al. (2018)
Densidad al 12 % de humedad	$d_{12\%} = 0,991$	Gutiérrez Oliva y Plaza Pulgar (1967)
Relación de copa	$W_C \cdot W_T = 0,4268$	Menéndez-Miguélez et al. (2021)
Relación raíz-vástago	$R = 0,536$	SEI (2024)
donde W_T es la biomasa total, t M.S. son las toneladas de materia seca, $d_{(12\%)}$ es la densidad al 12 % de humedad, W_{fuste} es la biomasa del fuste, V es el volumen del rodal en m ³ /ha, $W_C \cdot W_T$ es la relación de copa y R es la relación raíz-vástago.		

En último lugar, se plantea la transformación de biomasa obtenida a absorciones de dióxido de carbono. Su cálculo se desarrolla en la siguiente ecuación:

$$CO_2 = W_t \cdot F_C \cdot \frac{PM_{CO_2}}{PM_C} \quad (\text{Ec. 4}),$$

donde W_t es la biomasa total en toneladas, F_C es el factor de carbono (48,4 % para esta especie) (SEI, 2024), PM_{CO_2} es el peso molecular de CO_2 siendo 44 y PM_C es el peso molecular de C siendo 12.

Se emplea la relación de peso molecular entre el carbono y el CO_2 junto con un factor de contenido de carbono de la madera que se encuentra tabulado para una serie de especies (Montero et al., 2005), todo ello es producto del valor de biomasa obtenido. Así, las toneladas de biomasa producidas se transformarán en toneladas de dióxido de carbono absorbidas por la masa para el tiempo evaluado.

A modo de resumen, se incluyen los resultados de la aplicación de las metodologías de conversión de volumen a biomasa y de biomasa de absorciones de CO_2 para los modelos presentados (Tabla 72):

Tabla 72. Biomasa media anual y biomasa acumulada anual en toneladas (t) y absorciones de CO₂ medias anuales y acumuladas anuales en toneladas (t) para el cómputo de los modelos definidos para Quercus robur según la línea base establecida por el Compendio de Silvicultura de España y su correspondiente alargamiento del turno de corta a partir de las dos metodologías de cálculo de biomasa propuestas.

	Diéguez–Aranda et al. (2009) <i>Modelo estático</i>		Diéguez–Aranda et al. (2009) <i>Modelo dinámico</i>	
	Metodología 1 (M1)			
Años	140	160	140	160
Biomasa media anual (t)	2,01	1,86	1,94	1,79
Biomasa acumulada anual (t)	5,49	5,17	7,43	6,91
Absorción media anual (t)	3,57	3,30	3,45	3,17
Absorción acumulada anual (t)	9,74	9,17	13,18	12,26
	Metodología 2 (M2)			
Años	140	160	140	160
Biomasa media anual (t)	2,75	2,54	2,51	2,31
Biomasa acumulada anual (t)	7,15	6,73	9,56	8,91
Absorción media anual (t)	4,87	4,50	4,46	4,10
Absorción acumulada anual (t)	12,69	11,94	16,97	15,80
	Especificaciones empleadas por el modelo			
Índice de sitio / edad de referencia (años)	15 / 60		18 / 60	
Densidad inicial (pies/ha)	5000		5000	
Relación raíz–vástago	SEI (2024)		SEI (2024)	
Esquema de claras	Compendio		Compendio	

7. Ejemplo de uso de la aplicación Excel para *Pinus sylvestris*

Una vez detallados los modelos de crecimiento empleados, las metodologías de conversión de volumen a biomasa y la transformación a absorciones de CO₂, por parte del equipo ICIFOR, INIA–CSIC se han desarrollado dos aplicaciones/calculadoras Excel por las cuales las personas usuarias u órganos gestores podrán poner en práctica estos modelos con las especificaciones de sus rodales. Los Excel reciben el nombre de Calculadora de absorciones *ex ante* de dióxido de carbono de las especies españolas, diferenciando un documento para modelos estáticos y otro documento para modelos dinámicos.

A partir de este momento, se desarrolla un guía simple y de ejemplo para el caso concreto de *Pinus sylvestris* para el Excel de Modelos dinámicos. Cabe destacar, que la estructura para los dos Excel es la misma, por lo que la ejemplificación con uno de ellos es suficiente para comprender el funcionamiento de ambas aplicaciones. Del mismo modo, todas las especies incluidas cuentan con el mismo formato y la misma estructura de secciones, por lo que la ejemplificación con *Pinus sylvestris* es suficiente para explicar el funcionamiento del Excel.

En primer lugar, y de forma predeterminada, al abrir la aplicación/calculadora, la primera pestaña que aparece es la de la *Portada*. En esta pestaña aparecen desarrollados los logos oficiales, el título del Excel y el contenido a modo de índice (Figura 15). La aplicación queda estructurada de forma que los modelos desarrollados para cada una de las especies aparecen en una pestaña independiente.

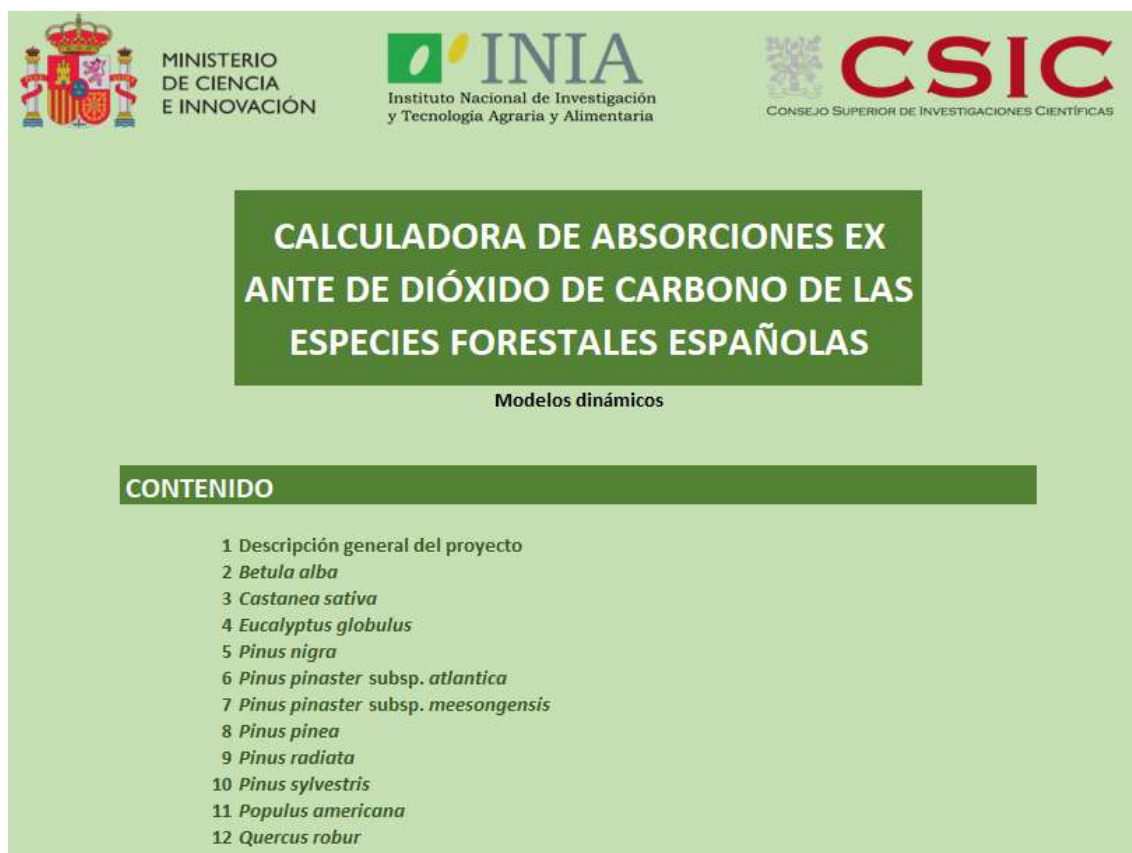


Figura 15. Captura de la portada de la aplicación/calculadora.

Las personas usuarias podrán navegar por la aplicación mediante la selección directa de las pestañas del Excel (situado en la parte inferior) (Figura 16) o clicando los puntos del contenido mediante la creación de un enlace directo (Figura 15).

Portada	1. Descripción	2. Betula alba	3. Castanea sativa	4. Eucalyptus globulus	5. Pinus nigra
----------------	----------------	----------------	--------------------	------------------------	----------------

Figura 16. Captura de las pestañas de la aplicación/calculadora.

De cualquiera de las formas posibles de selección de la pestaña, si la persona usuaria selecciona 1. *Datos generales del proyecto* a partir del índice de contenidos o 1. *Descripción* a partir de las pestañas inferiores, se abre acceso de la pestaña de *Descripción general* (Figura 17). Como se puede apreciar en la Figura 17, a la izquierda de la ventana aparece un índice que se mantiene para todas las pestañas del libro de Excel. Este índice se crea con el objetivo de poder navegar con mayor facilidad a lo largo de los modelos, sin necesidad de acudir a la selección manual de las pestañas de la parte inferior (Figura 16). Mediante un simple clic, el órgano gestor podrá seleccionar la especie de interés. El botón **VOLVER** ofrece un retorno hacia la portada (Figura X). Entrando en el detalle de esta pestaña, se realiza una descripción del marco del proyecto a partir del cual se desarrolla la aplicación calculadora y unas pequeñas pinceladas del funcionamiento de la misma. Si bien, se hace una síntesis del funcionamiento de la aplicación, se recomienda la lectura del ejemplo del presente documento del uso de la aplicación para una mayor claridad en su operación.

Índice	Descripción general	
	1. Marco del proyecto	2. Funcionamiento de la aplicación
VOLVER 1. Datos generales del proyecto 2. Betula alba 3. Castanea sativa 4. Eucalyptus globulus 5. Pinus nigra 6. Pinus pinaster subsp. aristata 7. Pinus pinaster subsp. merisgamensis 8. Pinus pinus 9. Pinus radiata 10. Pinus sylvestris 11. Populus americana 12. Quercus robur	En el marco del sector forestal se ha despertado un alto interés por la generación de créditos ligados a proyectos de absorción por forestación, reforestación o restauración post incendios. Estos proyectos se fundamentan en la capacidad de fijación de carbono (C) atmosférico por parte de los nuevos bosques y terrenos forestales, generados de manera artificial en antiguos terrenos agrícolas, terrenos forestales yermos o bosques degradados. De manera simultánea al auge de estos proyectos, surge la necesidad de desarrollar nuevos proyectos de absorción basados en la modificación de la gestión forestal actualmente aplicada en bosques ya establecidos, al objeto de optimizar la capacidad de fijación de C de los mismos. La implementación de estos nuevos proyectos de absorción por gestión forestal mejorada permitirá ampliar y mejorar los sistemas voluntarios de registro de huella de carbono existentes. De la mano del proyecto ECO2FOR, en el presente documento, se presentan una serie de calculadoras para poder determinar el aumento en los almacenes de C asociados a los nuevos proyectos de absorción forestal para las principales masas forestales de nuestro país. En estos nuevos proyectos, las prácticas de gestión forestal van más allá de la explotación de la biomasa y pueden resultar en un aumento de la	A partir del desarrollo de la presente aplicación/calculadora las personas usuarias u órganos gestores podrán modelar el crecimiento dinámico de sus masas a partir de sus especificaciones concretas. La calculadora de absorciones es ante de carbono de las especies forestales españolas para los modelos dinámicos de crecimiento modeliza en último término la biomasa de las masas forestales y su transformación a absorciones de CO₂. De forma genérica, se han empleado dos metodologías de conversión del volumen del rodal a biomasa: el uso de factores de expansión de la biomasa (Metodología 1 M1) o la aplicación de un factor de densidad de la madera con un contenido de humedad del 17 % tabulado por especie (Metodología 2 M2). La transformación de la biomasa en absorciones de CO₂ se realiza empleando la metodología propuesta por el Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEI). La calculadora se encuentra diseñada para las principales masas españolas y cada pestaña de especie (seleccionables mediante un simple clic en la parte izquierda de la aplicación Índice) se estructura de la siguiente manera: 1. Modelo y datos de partida: en esta sección el órgano deberá elegir el modelo de crecimiento de la especie a partir de la opción desplegable en Modelo. La elección de un modelo u otro (en el caso de existir múltiples opciones) deberá ser elegido en función de la mejor adecuación de la región empleada por el modelo seleccionado. El órgano podrá modificar los datos de índice de sitio (edad de referencia de la masa y altura dominante) edad inicial, turno base y turno alargamiento, la densidad de partida, el peso de la clara y el valor de B (coeficiente raíz-vástago). También es posible incluir en el desarrollo del modelo la opción de desarrollar la mortalidad natural (si es que el modelo la contempla) y la selvicultura observada del modelo. Estos datos deberán ser incluidos a partir de inventario. Si bien no se disponen de estos datos, se podrán dejar los valores propuestos e iniciales para hacer una primera estimación de las absorciones generadas. Modificando los valores anteriormente mencionados, de forma automática, se verán modificados los valores de biomasa y absorción. El único procedimiento que hay que realizar de forma manual es la aplicación del régimen de claras (sección 21. Si a nivel particular, no se dispone de un régimen de claras de la masa, existe la

Figura 17. Captura de la Descripción general.

Una vez clicada la opción 10. *Pinus sylvestris* aparecen los detalles que ofrecen los valores de biomasa y absorciones de CO₂. La pestaña de las especies aparece siempre estructura en las siguientes secciones o bloques: (1) *Modelo y datos de partida* (Figura 18), (2) *Selvicultura propuesta* (Figura 19), (3) *Tablas de cuantificación en toneladas para biomasa y CO₂* (Figura 20), (4) *Gráficas comparativas de turno para biomasa (Wt) y CO₂* (Figura 21) y (5) *Esquema de claras* (Figura 22).

La sección fundamental para el desarrollo adecuado de los modelos es la sección 1. *Modelo y datos de partida* (Figura 18). La persona usuaria deberá seleccionar el modelo de crecimiento que mejor se ajuste a las situaciones particulares de su rodal. Para el caso concreto de *Pinus sylvestris*, mediante el clic en la celda derecha de *Modelo* se abre un desplegable para la selección del modelo de crecimiento de Diéguez–Aranda et al. (2009) o del Río (1999). La selección de un modelo u otro deberá ajustarse según las especificaciones del rodal particular con los detalles empleados para el desarrollo del modelo en cuanto a región, rango de edad, rango de densidad y particularidades de la

masa (Tabla 3). Por ejemplo, si el rodal del particular para una masa de *Pinus sylvestris* se encuentra ubicado en Galicia, el modelo que se deberá emplear es el de Diéguez-Aranda et al. (2009) el cual se encuentra proyectado para esa región.

Los siguientes datos de esta sección (altura, edad, turno, densidad, intensidad de corta) también son modificables por el órgano gestor. Se recomienda que estos datos sean introducidos a partir de inventario para asegurar una más ajustada modelización del crecimiento de la masa. Existe la opción de incluir la mortalidad natural esperada del modelo. En función de la versión de Excel empleada, esta opción aparece como un botón seleccionable o como es en este caso con un texto "FALSO". Si la persona usuaria desea modelizar esta mortalidad, basta con modificar el texto manualmente a "VERDADERO". También, como opción desplegable aparece el valor de R (coeficiente raíz-vástago). En el caso de que las usuarias no cuenten con datos de inventario, podrán usar los valores que se ofrecen de forma predeterminada, obtenidos estos por una combinación de las especificaciones del modelo con el Compendio de silvicultura de España (Serrada et al., 2008).

ÍNDICE		VOLVER	
1. Datos generales del proyecto			
2. <i>Betula alba</i>			
3. <i>Castanea sativa</i>			
4. <i>Eucalyptus globulus</i>			
5. <i>Pinus nigra</i>			
6. <i>Pinus pinaster</i> subsp. <i>atlantica</i>			
7. <i>Pinus pinaster</i> subsp. <i>neesogensis</i>			
8. <i>Pinus pinea</i>			
9. <i>Pinus radiata</i>			
10. <i>Pinus sylvestris</i>			
11. <i>Populus americana</i>			
12. <i>Quercus robur</i>			

1. Modelo y datos de partida		
Modelo	Diéguez-Aranda et al. (2009)	
Altura dominante	29	m
Edad de la masa	100	años
Edad inicial	20	años
Turno (base)	120	años
Turno (alargamiento)	140	años
Intervalo	5	años
Densidad inicial	1200	pies/ha
Extracción claras	90	%
Mortalidad natural	FALSO	
Régimen de claras	Manual	
Valor de R	0.279	

Figura 18. Captura de la sección primera correspondiente a Modelo y datos de partida para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.

Como se aprecia en la Figura 18, el régimen de claras es el único detalle para la modelización que deberá ser introducido de forma manual. De forma predeterminada, la aplicación/calculadora ofrece un esquema de silvicultura extraído generalmente del Compendio (Serrada et al., 2008). Esta opción puede servir como orientación para los casos en los que los particulares no tengan un esquema de claras definido. En cualquiera de los casos, si las claras ya están definidas por estos, las claras pueden ser introducidas en la aplicación. Para la introducción manual del esquema de claras, previamente introducidos los datos de partida de la sección 1, el órgano gestor deberá prestar atención a la sección segunda *Silvicultura propuesta*, en concreto a la parte del *Régimen* (Figura 19). La persona usuaria deberá introducir la densidad o área basimétrica objetivo a conseguir tras la aplicación de las claras en el año deseado (para los modelos estáticos únicamente hay opción por densidad). Es importante que estos datos también sean introducidos en la segunda tabla de esta sección (correspondiente al alargamiento de turno) para poder obtener los valores de biomasa y absorciones. El

esquema de claras definido se expone gráficamente y de forma automática en la sección quinta *Esquema de claras* (Figura 22).

Entrando en detalle de la sección segunda (Figura 19), se ofrece una especie de tabla de producción en el que se pueden observar los valores de altura dominante, densidad, diámetro cuadrático, área basimétrica, volumen y valores de biomasa y absorciones para las dos metodologías conversión y rango de edad. Como se ha comentado con anterioridad, existen dos tablas de producción, una para el turno base y otra para el turno de alargamiento.

2. Selvicultura propuesta													
Régimen		Masa							M1	M2	M1	M2	
Densidad	G	Edad	H0	N	Hm	Dg	G	V	Wt	Wt	CO ₂	CO ₂	
900		20	7.31	1200	5.99	19.87	37.22	126.86	131.08	98.28	244.65	183.41	
		25	9.29	1200	7.91	22.40	47.28	199.04	195.04	147.19	364.01	274.71	
		30	11.19	1200	9.77	24.12	54.83	272.10	256.56	195.47	478.82	364.81	
		30	11.19	900	9.77	24.87	43.72	217.09	203.33	155.17	379.48	289.60	
		35	13.01	900	11.55	26.71	50.41	285.88	258.85	199.69	483.11	372.69	
		40	14.73	900	13.24	28.09	55.78	353.09	311.47	242.59	581.30	452.76	
400		45	16.36	900	14.83	29.17	60.14	417.60	360.76	283.34	673.31	528.80	
		50	17.90	900	16.33	30.02	63.71	478.88	406.68	321.73	759.01	600.45	
		55	19.34	900	17.74	30.71	66.67	536.73	449.33	357.73	838.60	667.65	
		60	20.70	900	19.07	31.28	69.16	591.14	488.88	391.42	912.42	730.52	
		60	20.70	400	19.07	34.80	38.04	325.50	262.78	212.77	490.44	397.09	
		65	21.98	400	20.31	36.44	41.71	376.21	298.36	243.77	556.85	454.95	
300		70	23.17	400	21.48	37.86	45.04	425.67	332.43	273.82	620.42	511.04	
		70	23.17	300	21.48	39.04	35.92	339.62	263.32	217.73	491.44	406.37	
		75	24.30	300	22.58	40.74	39.11	385.59	294.19	245.46	549.06	458.11	
		80	25.36	300	23.61	42.25	42.06	430.52	323.84	272.43	604.38	508.45	
		85	26.35	300	24.58	43.59	44.78	474.18	352.16	298.53	657.26	557.15	
		90	27.29	300	25.50	44.80	47.29	516.40	379.15	323.67	707.61	604.07	
200		95	28.17	300	26.36	45.88	49.60	557.07	404.78	347.82	755.46	649.14	
		95	28.17	200	26.36	48.01	36.21	406.90	292.18	252.96	545.30	472.11	
		100	29.00	200	27.17	49.56	38.59	444.83	315.42	275.35	588.68	513.89	
		105	29.78	200	27.94	50.98	40.82	481.83	337.73	297.12	630.32	554.53	
150		110	30.52	200	28.66	52.28	42.94	517.81	359.10	318.24	670.20	593.94	
		110	30.52	150	28.66	53.91	34.24	413.13	283.99	253.22	530.02	472.59	
		115	31.22	150	29.34	55.51	36.31	446.88	303.51	272.94	566.45	509.40	
		120	31.89	150	29.99	57.00	38.28	479.92	322.29	292.20	601.50	545.34	

Figura 19. Captura de la sección segunda correspondiente a Selvicultura propuesta para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.

Una vez introducidos los datos de partida y el esquema de claras, de forma automática se ofrecen los resultados numéricos y gráficos para la biomasa y absorciones de CO₂ para las dos metodologías de conversión propuestas y los dos turnos que se empleen. Los resultados numéricos en toneladas de biomasa y CO₂ tanto para valores anualizados como sobre el total del turno en la sección tercera *Tablas de cuantificación en toneladas para biomasa y CO₂* (Figura 20). Por último, los resultados gráficos se desarrollan en la sección cuarta Gráficas comparativas de turno para biomasa (Wt) y CO₂ (Figura 21).

3. Tablas cuantificación en toneladas para biomasa y CO ₂					
Metodología	Biomasa media	Biomasa acumulada	CO ₂ medio	CO ₂ acumulado	Turno
M1	2.62	7.15	4.90	13.35	120
	2.38	6.52	4.44	12.17	140
M2	2.18	6.06	4.06	11.31	120
	2.01	5.60	3.75	10.46	140
Nota: Valores anualizados					
Metodología	Biomasa media	Biomasa acumulada	CO ₂ medio	CO ₂ acumulado	Turno
M1	314.89	858.44	587.70	1602.13	120
	333.02	912.90	621.52	1703.78	140
M2	261.18	727.11	487.45	1357.04	120
	281.32	784.61	525.04	1464.34	140
Nota: Valores sobre el total del turno					

Figura 20. Captura de la sección tercera correspondiente a Tablas de cuantificación en toneladas para biomasa y CO₂ para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.

Estas aplicaciones/calculadoras podrán estar disponibles y accesibles en la página bien del INIA ([enlace](#)) o en la futura página web del ICIFOR. Su destino se encuentra aún por definir.

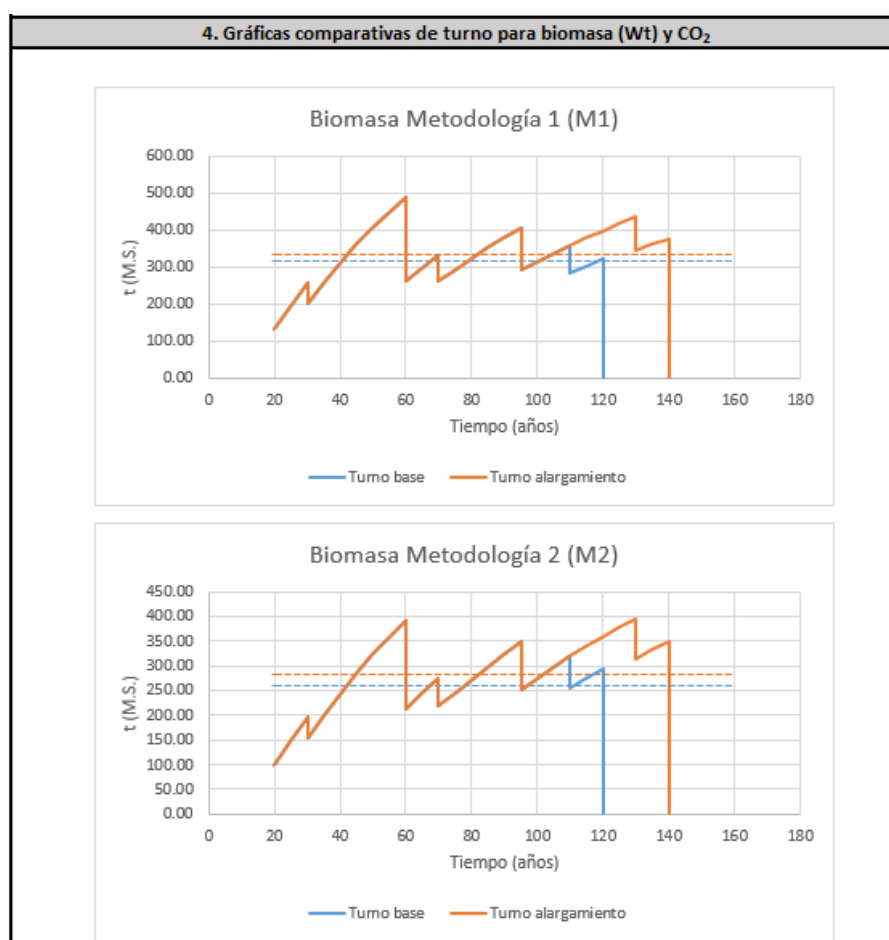


Figura 21. Captura de la sección cuarta correspondiente a Gráficas comparativas de turno para biomasa (Wt) y CO₂ para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.

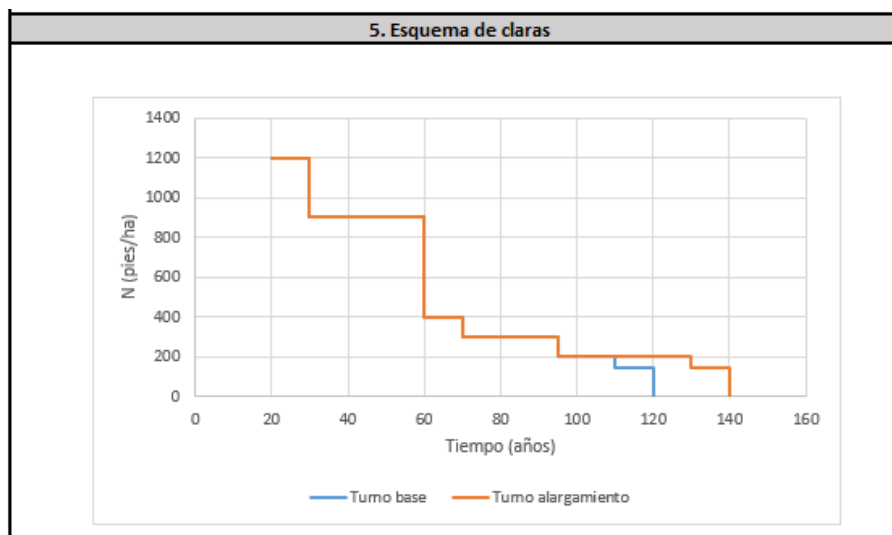


Figura 22. Captura de la sección quinta correspondiente a Esquema de claras para el caso concreto de *Pinus sylvestris*.

8. Agradecimientos

El proyecto ECO2FOR cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU

9. Referencias

- Adame, P., Cañellas, I., Roig, S. y del Río, M. 2006. Modelling dominant height growth and site index curves for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Annals of Forest Science*, 63, 929–940.
- Ameray, A., Bergeron, Y., Valeria, O., Montoro Girona, M., y Cavard, X. 2021. Forest Carbon Management: a Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests. *Current Forestry Reports*, 245–266.
- Barrio–Anta, M., Sixto–Blanco, H., de Viñas, I. C. R., y 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 (3–4), 1167–1178.
- Bastin J. F., Finegold, Y., García, C., MolliconE, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., y Crowther, T. W. 2019. The global tree restoration potential. *Science*, 365 (80), 76–79.
- Bravo, F., Alvarez–González, J. G., del Río, M., Barrio, M., Bonet, J. A., Bravo–Oviedo, A., Calama, R., Castedo–Dorado, F., Crecente–Campo, F., Condes, S., Diéguez–Aranda, U., González–Martínez, S. C., Lizarralde, I., Nanos, N., Madrigal, A., Martínez–Millán, F. J., Montero, G., Ordoñez, C., Palahl M., Pique, M.; Rodríguez, F., Rodríguez–Soalleiro, R., Rojo, A., Ruíz–Peinado, R., Sánchez–González, M., Trasobares, A., y Vázquez–Pique, J. 2012. Growth and yield models in Spain: historical overview, contemporary examples and perspectives. *Forest Systems*, 20 (2).
- Bravo–Oviedo, A., del Río, M., y Montero, G. 2004. Site index curves and growth model for Mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. *Forest Ecology and Management*, 201 (2–3), 187–197.
- Calama, R., Cañadas, N., y Monter, G. 2003. Inter–regional variability in site index models for even–aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Annals of Forest Science*, 60, 259–269.
- Calama, R., Ruíz–Fernández, 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. En: Sociedad Española de Ciencias Forestales. *8 Congreso Forestal Español*. Lleida: Sociedad Española de Ciencias Forestales, 1–12.
- Calama, R., Sánchez–González, M., y Montero, G. (2007). Management oriented growth models for multifunctional Mediterranean forests: the case of stone pine (*Pinus pinea* L.). *EFI proceedings*, 56, 57–70.
- Castaño–Santamaría, J., Barrio–Anta, M., y Álvarez–Álvarez, P. 2013. Elaboración de diagramas de manejo de densidad a escala regional para masas de *Quercus pyrenaica* Willd. en el Noroeste de España. En: Sociedad Española de Ciencias Forestales. *6 Congreso Forestal Español*. Vitoria: Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Castaño–Santamaría, J., Obeso–Suárez, J. R., y Barrio–Anta, M. 2022. New forestry tools for natural beech forests in northwestern Spain. *Forest systems*, 31(2), 7.

- del Río, M. 1999. *Régimen de claras y modelo de producción para Pinus sylvestris L. en los Sistemas Central e Ibérico*. Tesis doctoral. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- del Río, M., López, E., y Montero, G. 2006. *Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de Pinus pinaster Ait., Pinus sylvestris L. y Pinus nigra Arn. en Castilla y León*. Castilla y León: Consejería de Medio Ambiente.
- 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. A., Balboa–Murias, M. A., Gorgoso–Varela, J. J., y Sánchez–Rodríguez, F. 2009. *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. Lugo: Universidad de Santiago de Compostela.
- ECO2FOR. 2024. *Qué es eco2for*. [En línea] Disponible en: <<https://eco2for.com/que-es-eco2for/>> [consulta: 15 de enero de 2025].
- García–Sánchez, S. G., Rodríguez–Soalleiro, R., González, J. A., Costas, R. G., y Alonso, G. V. 1996. First growth results of Douglas fir plantation fifteen to thirty years old in the Northwest of Spain. *Forest Systems*, 5 (2), 231–243.
- García–Villalibre, J. D. 2015. *Modelización del crecimiento y la producción de plantaciones de Eucalyptus globulus Labill. en el noroeste de España*. Tesis doctoral. Lugo: Universidade de Santiago de Compostela.
- Gómez–Loranca, J. G. 1996. *Pinus nigra Arn. en el sistema ibérico: tablas de crecimiento y producción* (No. 93). Madrid: INIA.
- González–Gaarslev, D., Menéndez–Miguel, 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. En: Sociedad Española de Ciencias Forestales. *9 Congreso Forestal Español*. Gijón: Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Gutiérrez Oliva, A., y Plaza Pulgar, D. 1967. *Características físico–mecánicas de las maderas españolas*. Madrid, España: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE). Ministerio de Agricultura.
- HAZI Fundazioa. 2022. *Guía de la selvicultura del haya – macizo pirenaico y otros apéndices de interés*. Midi: HAZI.
- HAZI Fundazioa. *Informe “Ecuaciones de cubicación para pino radiata en el País Vasco”*. Vitoria: HAZI.
- Liski, J., Pussinen, A., Pingoud, K., Mäkipää, R., y Karjalainen, T. 2001. Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research*, 31 (11), 13.
- López–Sánchez, C. A. 2009. *Estado selvícola y modelos de crecimiento y gestión de plantaciones de Pseudotsuga menziesii (Mirb.) franco en España*. Tesis doctoral. Galicia: Universidade de Santiago de Compostela.

- Madrigal, A., Álvarez–González, J. G., Rodríguez–Soalleiro, R., y Rojo, A. 1999. *Tablas de producción para los montes españoles*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar.
- Martínez–Millán, J., Ara, P., y González–Doncel, I. 1993. Ecuaciones alométricas de tres variables: estimación del volumen, crecimiento y porcentaje de corteza de las principales especies maderables españolas. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 2 (2), 211–228.
- Menéndez–Miguélez, 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).
- MITECO. 2021. *Fondo de Carbono FES–CO₂. Proyectos Clima*. [En línea] Disponible en: <<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/fondo-carbono/proyectos-clima/que-es-un-proyecto-clima.html>> [consulta: 15 de enero de 2025].
- Montero, G., Ruíz–Peinado, R., y Muñoz, M. 2005. *Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*. Madrid: INIA.
- Montero, G., Calama, R., y Ruíz–Peinado, R. 2008. Selvicultura de *Pinus Pinea* L. *Compendio de Selvicultura de Especies*, 431–470.
- Montero, G., Cañellas, I., y Ruíz–Peinado, R. 2001. Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Forest Systems*, 10 (1), 179–201.
- Mora–Martínez, J. V., del Río, M., y Bravo–Oviedo, J. A. 2012. Variación regional de la producción en volumen y área basimétrica para "*Pinus Nigra*" Arn. en masas españolas. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (34), 177–183.
- Pita, P.A. 1967. *Tablas de cubicación por diámetros normales y alturas totales. P. silvestris – P. halepensis – P. laricio – P. pinea – E. globulus–Norte – E. globulus–Sur – E. camaldulensis*. Madrid: Ministerio de Agricultura, IFIE.
- Prada, M., González–García, M., Majada, J., y Martínez–Alonso, C. 2019. Development of a dynamic growth model for sweet chestnut coppice: A case study in Northwest Spain. *Ecological Modelling*, 409, 108761.
- Rodríguez, F., Lizarralde, I., y Bravo, F. 2015. Comparison of stem taper equations for eight major tree species in the Spanish Plateau. *Forest Systems*, 24 (3), 2.
- Rodríguez–Soalleiro, R. 1995. *Crecimiento y producción de masas forestales regulares de Pinus pinaster Ait. en Galicia. Alternativas selvícolas posibles*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rojo, A., Álvarez–González, J.G., Grandas, J.A., y Diéguez–Aranda, U. 2005. Tablas de Producción de Selvicultura media para el abedul (*Betula alba* L.) en Galicia. En: Sociedad Española de Ciencias Forestales. *4 Congreso Forestal Español*. Zaragoza: Sociedad Española de Ciencias Forestales.

- Ruíz–Peinado, R., del Río, M., y Montero, G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20 (1), 176–188.
- Ruíz–Peinado, R., Montero, G. y del Río, M. 2012. Biomass models to estimate carbón stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, 21 (1), 42–54.
- Sánchez, F., Rodríguez, R., Rojo, A., Álvarez, J. G., López, C., Gorgoso, J. Y., y Castedo, F. 2003. Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Investigaciones Agrarias: Sistemas de Recursos Forestales*, 12 (2), 65 – 83.
- Serrada, R., Montero, G. y Reque, J. A. 2008. *Compendio de Selvicultura Aplicada de España*. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria y Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEI). 2024. *Metodologías de estimación de emisiones. Cambio en las existencias de carbono de la biomasa viva en las tierras forestales que permanecen como tales*. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- Vanclay, J. 1994. *Modelling Forest Growth and Yield*. Wallingford: CAB International.
- Vieilledent, G., F. J. Fischer, J. Chave, D. Guibal, P. Langbour, y Gérard. J. 2018. New formula and conversion factor to compute basic wood density of tree species using a global wood technology database. *American Journal of Botany*, 105 (10), 1653–1661.
- Zanne, A. E., López–González, G., Coomes, D. A., ILIC, J., Jansen, S., Lewis, S. L., Miller, R. B., Swenson, N. G., Wiemann, M. C., y Chave, J. 2009. Global Wood density database. *Open Journal of Ecology*, 7 (3).

ANEXO (A1). Listado de abreviaturas y unidades

BEF	Factor de expansión de biomasa.
$d_{(12\%)}$	Densidad de la madera al 12 % de humedad.
Dg	Diámetro medio cuadrático en cm.
Dg ₁	Diámetro cuadrático en cm en el momento anterior a la clara.
Dg _{ext}	Diámetro medio cuadrático en cm de la masa de que se va extraer con las claras.
F _c	Factor de carbono.
G	Área basimétrica en m ² /ha.
G ₁	Área basimétrica en m ² /ha en el momento inicial (área basimétrica de base).
G ₂	Área basimétrica en m ² /ha en t ₂ obtenida en función del G ₁ .
G _{ext}	Área basimétrica en m ² /ha extraída con la clara.
H ₀₁	Calidad de estación.
H ₀₂	Altura dominante en metros (m).
H ₁₅	Altura dominante en metros (m) a los 15 años.
Hm	Altura media en metros (m).
IS	Índice de sitio.
M.S.	Materia seca.
N	Densidad. Número de pies por hectárea (pies/ha).
N ₁	Densidad de la masa en pies por hectárea (pies/ha) el momento inicial (densidad de base).
N ₂	Mortalidad natural de la masa en pies por hectárea (pies/ha) obtenida a partir de la densidad de la masa en el momento anterior.
N _{t-1}	Densidad en pies por hectárea (pies/ha) en la edad anterior a la estimada en N.
PM	Peso molecular.
R	Relación raíz-vástago.
t ₁	Edad de referencia en años.
t ₂	Edad en años.
V	Volumen en m ³ /ha.
V _u	Volumen del árbol unitario.
W _{C-W_T}	Relación de copa.
W _{fuste}	Biomasa del fuste.
W _t	Biomasa total en toneladas de materia seca.
W _u	Biomasa del árbol unitario.