



9CFE-1324

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1



Elaboración de escenarios selvícolas para simulación balance de carbono. Ejemplo para *Fagus sylvatica* L. en Navarra.

GOICOECHEA BARRIOS, M. (1), MOLINA TERRÉN, C. (2), HERNANDO CHICOTE, S. (2), PRIMICIA ÁLVAREZ, I. (2), CANTERO AMIANO, A. (3), CISNEROS GONZÁLEZ, O. (4), ALONSO PONCE, R. (4) Y PÉREZ RODRÍGUEZ F. (4)

(1) GAN-NIK.

(2) Gobierno de Navarra.

(3) Fundación HAZI Fundazioa.

(4) Föra Forest Technologies.

Resumen

Entre las múltiples demandas de la sociedad que definen la gestión forestal, maximizar la capacidad de los montes para fijar carbono es una constante en los últimos años. Dentro del Proyecto Gestforest CO2, incluido en la convocatoria 2022 de la Eurorregión Nueva-Aquitania Euskadi Navarra, se han desarrollado metodologías para el cálculo del secuestro y almacenamiento de carbono en los hayedos pirenaicos.

En lo relativo a la gestión forestal, la neutralidad climática que persigue la UE para 2050, busca optimizar la fijación de carbono en suelo, árboles y productos. Se han propuesto diversas prácticas como alargar el turno, reducir cortas o buscar madera de mayores dimensiones. Otras medidas son la movilización de madera para abastecer a la industria de la construcción y la gestión selvícola orientada a la defensa contra incendios.

Toda práctica requieren de herramientas que faciliten la visualización de sus efectos. El objetivo de esta comunicación es detallar los modelos y el proceso de simulación de distintos itinerarios selvícolas orientados a aumentar la retención de carbono en hayedos. Los resultados se integran en el software CO2Fix para cuantificar el balance de carbono, incluyendo el carbono fijado en productos de madera.

Palabras clave

CO2, CO2Fix, haya, créditos de carbono.

1. Introducción

El proyecto GESTFOREST CO2 (HAZI Fundazioa, GAN-NIK, Centre national de la propriété forestière (CNPF)) tiene por objetivo el desarrollo de una metodología común a nivel Eurorregión Nueva Aquitania-Euskadi-Navarra para cuantificar los efectos de la gestión forestal sostenible en la absorción y almacenamiento de CO2 en diferentes tipos de hayedos pirenaicos, así como su aplicación en los sistemas de compensación como herramienta de mitigación para el cambio climático. Se concreta en una metodología de cálculo de absorción y almacenamiento de carbono que puede ser empleada por el sector forestal de la Eurorregión y homologable por la Administración.



Se ha elegido el haya (*Fagus sylvatica* L.) como especie común y representativa de las 3 regiones. Aunque esta metodología se va a aplicar a hayedos pirenaicos, se espera que en el futuro pueda ser extrapolable a otras especies forestales y otros ámbitos geográficos.

A partir de la información suministrada por los técnicos implicados en la gestión selvícola de hayedos, dentro del proyecto se proponen varios itinerarios selvícolas de interés como escenarios en los que valorar el balance de carbono.

- Itinéraires techniques de *Fagus sylvatica* (CENTRE NATIONAL DE LA PROPIÉTÉ FORESTIÈRE, 2020): Son recomendaciones selvícolas aplicadas en Francia. Incluyen modelos para montes regulares, irregulares, transformación de regular a irregular, monte bajo, monte medio, etc.
- GOFAGUS (GRUPO OPERATIVO FAGUS, 2023). Se han elaborado los siguientes itinerarios:
 - ITINERARIO H1: Selvicultura de madera de calidad El objetivo de gestión es obtener árboles con un volumen individual al final del turno de unos 1.5 m³, haciendo intervenciones con un mínimo de 30-40 m³/ha en cada intervención.
 - ITINERARIO H2: Selvicultura media partiendo de alta densidad El objetivo de gestión es obtener árboles con un volumen individual al final del turno de entre 1 a 1.2 m³, haciendo intervenciones con un mínimo de 30-40 m³/ha en cada intervención y partiendo de una densidad inicial alta de unos 10000 pies/ha.
 - ITINERARIO H3: Selvicultura media partiendo de baja densidad El objetivo de gestión es obtener árboles con un volumen individual al final del turno de entre 1 a 1.2 m³, haciendo intervenciones con un mínimo de 30-40 m³/ha en cada intervención y partiendo de una densidad inicial baja de unos 4000 pies/ha.
 - ITINERARIO H4: Masa irregular (Continuous Cover Forestry) El objetivo de gestión es obtener árboles con un volumen individual al final del turno de 1.5 m³, con un tiempo de paso de 15, 25 o 35 años, extrayendo unos 75 m³/ha en cada intervención y partiendo de una densidad de equilibrio de unos 500 pies/ha.
 - ITINERARIO H5: Selvicultura media observada (Business As Usual) El objetivo de gestión no se corresponde a un objetivo métrico productivo, sin claros y esperando hasta los 50-60 años para la primera intervención, haciendo intervenciones con un mínimo de 30-40 m³/ha en cada intervención, partiendo de una densidad inicial de unos 5000 pies/ha y obteniendo productos finales muy heterogéneos.
- Planes Comarcales (SERVICIO DE MONTES. GOBIERNO DE NAVARRA & GAN-NIK, 2015).
 - Códigos 1.1.8.17, 2.1.8.17, 3.1.8.17 y 4.1.8.17. Hayedo en masa fundamentalmente monoespecífica con potencialidad productiva, con estructura de monte alto regular. También se incluyen, las masas adultas heterogéneas o con algún grado de irregularidad, o con productos predominantemente leñosos que son potencialmente productivas.
 - Código 5.1.8.17. Hayedo en masa principalmente monoespecífica,



con potencialidad productiva y estructura de monte bajo leñoso (también monte medio).

- Selvicultura del haya macizo pirenaico (OFFICE NATIONAL DES FORÊTS & FUNDACIÓN HAZI, 2022). Incluye itinerarios de monte alto irregular, monte bajo, monte medio, conversión y transformación.
- Tablas de producción para *Fagus sylvatica* L. en Navarra (MADRIGAL et al., 1992). Se proponen dos itinerarios:
 - Selvicultura media
 - Selvicultura de referencia
- Transformación. Son los modelos de paso desde los itinerarios productivos usuales hacia montes irregulares. Se define un momento de inicio de la transformación en función de una clasificación en tipos de masa propuesta por los gestores:
 - Tipo de masa A: masas entre 35 y 75 años, con madera delgada y madera gruesa.
 - Tipo de masa B: masas de 0 a 35 años. Pies menores
 - Tipo de masa C: masas en regeneración, pero a falta de la corta final. Las cortas de regeneración no han roto todavía la cobertura
 - Tipo de masa D: masas en regeneración en las que no se han iniciado las cortas de regeneración
- No intervención: No es un modelo aplicado en la gestión, pero es una de las referencias contempladas en los estudios sobre balance de carbono.

Cada uno de estos escenarios debe ser evaluado para distintas condiciones de densidad, calidad de estación, diámetro objetivo, volumen mínimo extraído en claras, etc. Y una vez evaluados, los resultados deben integrarse en algún sistema de cuantificación del balance de carbono, como CO2Fix (SCHELHAAS et al., 2004), (MASERA et al., 2003). Este software se utiliza ampliamente en el sector forestal. Básicamente requiere datos en forma de incremento en biomasa de las distintas fracciones (troncos, hojas, raíces y ramas). Además, el proyecto GESTFOREST contempla la valoración del carbono fijado en productos, por lo que las simulaciones deben incorporar los porcentajes de madera de sierra y trituración producidos en cada intervención.

2. Objetivos

Los objetivos de esta comunicación son:

- Elaborar modelos selvícolas que apoyan la simulación de escenarios de gestión del haya en Navarra
- Mostrar ejemplos de balance de carbono mediante el software CO2FIX

3. Metodología

nota sobre las abreviaturas:

en el texto se utilizan las abreviaturas habituales en dasometría: Dg, (diámetro medio cuadrático en cm), V (volumen por hectárea), Dm (diámetro medio en cm), G (área basimétrica en m²), N (densidad en árboles/ha), Ho (altura dominante según el criterio de Assman)

Los escenarios citados en la Introducción se pueden agrupar en modelos de monte regular y de monte irregular.

Metodología para los escenarios de monte regular

El esquema de simulación del incremento de biomasa y generación de productos maderables en montes regulares se resumen en los siguientes apartados:

1. **Calidad de Estación:** Se determina la evolución anual en altura-edad en función de la calidad de estación, utilizando las alturas a los 80 años como índices de sitio (13, 16, 19, 22 y 25 m). Se emplea la relación altura-edad de OCHOA (2000) en (GRUPO OPERATIVO FAGUS, 2023).
2. **Densidad Inicial:** Se propone una densidad inicial para el primer año del modelo, simulando distintas densidades entre 4000 y 14400 arb/ha para evaluar diferentes calidades y esquemas selvícolas, según las recomendaciones del cliente.
3. **Calendario e Intensidad de Intervenciones:** Cada uno de los distintos itinerarios selvícolas define un calendario e intensidad de las intervenciones selvícolas (clareos y claras) mediante un sistema tabular que incluye edad, tipo de tratamiento, código de la intervención (número de árboles restantes o porcentaje de corta en volumen, área basimétrica o número de pies), porcentaje de extracción total y porcentajes correspondientes a clara por lo bajo y por lo alto.
4. **Modelos de Masa GOFAGUS:** Se utilizan los modelos de masa de GOFAGUS para simular variables dasocráticas como el diámetro cuadrático medio (D_g), el volumen (V) y el diámetro medio (D_m) antes de cada clara. Las relaciones son: $D_g \sim f(N, H_o)$, $V \sim f(D_g, H_o, N)$, $D_m \sim f(D_g, N, G)$.
5. **Distribución Diamétrica y Aplicación de Intervenciones:** Para cada año, se calcula la distribución diamétrica de la masa antes de la clara. Se aplica la intervención propuesta (clareo o clara por lo bajo/alto) o la mortalidad natural si aún no se han iniciado las labores selvícolas. Se asume que, una vez iniciada la gestión, la mortalidad se incluye en las extracciones.
6. **Incremento Diametral:** Se calcula el incremento diametral de los árboles tras la intervención, utilizando un modelo de incremento en área basimétrica independiente de la edad, basado en (BIANCHI et al., 2023), con forma de ecuación exponencial. Se filtran los datos del IFN para eliminar incrementos extremos (menores al percentil 0.1 o mayores al percentil 0.9 para cada clase de 2 cm de diámetro).
7. **Diagramas de Manejo de Densidad:** Sobre los datos actualizados tras el incremento diametral, se aplican los diagramas de manejo de densidad de GOFAGUS para calcular los datos antes de la clara del siguiente año.
8. **Volumen de madera por destinos:** Para el cálculo del volumen de madera destinado a productos de larga duración (requerido por CO2Fix), se asume un porcentaje fijo del 75% de madera apta para uso estructural, basado en el estudio de campo del proyecto GOFAGUS. Solo se consideran aptos para sierra los árboles con diámetro normal superior a 20 cm.
9. **Fracciones de Biomasa:** Para el cálculo de las fracciones de biomasa (fuste, ramas, etc.), se emplean las ecuaciones de (MONTERO et al., 2005), con modificaciones: para la fracción de hojas se utiliza la ecuación de (BARTELINK, 1997) y para la raíz la de (GERTRUDIX et al., 2012).
10. **Generación de Archivo y Fin de Simulación:** A partir de los datos del



escenario, se genera un archivo CO2Fix en formato “.co2”. La simulación en monte regular finaliza con la corta final, pero se extiende por defecto a tres turnos.

Modelos Empleados en la Simulación de Montes Regulares:

Se han modelizado diversas variables necesarias para la simulación.

- **Modelo de Mortalidad:** La modelización de la mortalidad es crucial para la contabilidad del carbono en ecosistemas forestales, especialmente para el programa CO2Fix y escenarios de "no intervención". Se considera la mortalidad natural, dividida en dos tipos:
 - - **Mortalidad Dependiente de la Densidad:** Se modela mediante un Análisis de Frontera Estocástica (SFA, *Stochastic Frontier Analysis*), siguiendo la metodología propuesta por (AIGNER et al., 2023). El SFA se considera adecuado por sus propiedades estadísticas, sensibilidad a valores anómalos y facilidad de interpretación (TRIFKOVIĆ et al., 2023), (CHARRU et al., 2012) . Se utiliza el paquete "frontier" de R (COELLI & HENNINGSEN, 2020), (R CORE TEAM, 2024) y datos de parcelas con mortalidad entre los inventarios IFN3 e IFN4 del Inventario Forestal Nacional, limitándose a las provincias del País Vasco, Navarra, La Rioja, Burgos y Huesca, con masas monoespecíficas y fracción de cabida cubierta (FCC) mayor del 90%.
 - **Mortalidad Independiente de la Densidad:** Se calcula como la media de árboles muertos entre inventarios, asumiendo que se debe a sucesos aleatorios y utilizando el mismo valor para todas las calidades y edades.

Para la simulación, se compara la mortalidad calculada por ambos modelos y se utiliza el valor mayor para contabilizar el número de árboles muertos, especialmente en etapas con mortalidad natural.

- **Modelo de Incremento de Área Basimétrica Individual/Incremento Diametral Individual:** Para actualizar el diámetro individual, se ajusta un modelo de incremento en área basimétrica independiente de la edad, apto para masas regulares e irregulares. Se basa en el trabajo de (BIANCHI et al., 2023), aunque se opta por un modelo más sencillo con forma de ecuación exponencial, ya que no se dispone de medidas repetidas para el incremento en diámetro. Se filtran los datos del IFN para eliminar incrementos menores al percentil 0.1 o mayores al percentil 0.9 para cada clase de 2 cm de diámetro, siguiendo la recomendación de los autores. El ajuste se realiza con la librería minpack.lm de R (ELZHOF et al., 2023).
- **Modelo de Distribución Diamétrica:** Para aplicar las intervenciones propuestas (claras por lo alto, por lo bajo, etc.), se utiliza una distribución de Weibull de tres parámetros, según (GORGOSO-VARELA et al., 2021). Esta formulación requiere la estimación del diámetro mínimo, que se establece inicialmente en 5 cm y posteriormente se calcula mediante una regresión lineal con D_g , utilizando las mismas parcelas empleadas en el modelo de incremento diametral. **Metodología para los escenarios de monte**

irregular El papel de este escenario es ser la alternativa de gestión a un monte regular mediante una transformación a partir de una edad determinada. Se evalúa la diferencia en el balance del carbono respecto a la gestión de monte regular comparando ambas alternativas desde el inicio de la transformación. Los parámetros que se manejan en este escenario son:

- **Índice de sitio (IS)**, aproximado con el incremento diametral (según se explica más abajo), no corresponde a las ecuaciones de Ho_Edad . Se denomina como en las de monte regular (IS 13,16,19,22,25).
 - **Datos de inicio de monte regular**: Los datos de partida se recogen del modelo de monte regular, en concreto Edad, N y G. También se puede proporcionar datos reales medidos en rodales a evaluar.
 - **Área basimétrica objetivo (ab_objetivo)**. Los valores más habituales son 20-25 m²/ha, aunque se ha simulado desde 15 a 40 m²/ha.
 - **Margen de error para el cálculo del área basimétrica (precis_ab)**. Para aumentar la flexibilidad de la simulación, se contempla un intervalo admisible para alcanzar el área basimétrica objetivo (p.e, 1%, 5%).
 - **Rango de diámetros (d_max, d_min)**. La simulación de monte irregular genera árboles en todas las clases de edad. Se incluye en este modelo porque permite evaluar el impacto del incremento del turno (indirectamente) en la fijación de carbono. Como diámetro mínimo (d_min) se propone 7,5 cm, el diámetro máximo (d_max) se evalúa de 60.5 a 100.5, cada 10 cm.
 - **Peso de la intervención (peso_G)**. En tanto por uno de área basimétrica. Según las recomendaciones de los selvicultores, está entre 0.20 y 0.25.
 - **Rotación**: tiempo entre intervenciones. Se recomiendan intervenciones frecuentes, con un máximo de 10 años.
 - **Constante de Liocourt (a_liocourt)**. La constante de DE LIOCOURT se calcula a partir de la información aportada por el IFN, aunque se puede incluir directamente la que se considera en el escenario evaluado. Se asume que la incorporación de masa es constante, según los que requiere la curva de DE LIOCOURT para contar con un diámetro inicial de 7,5 cm. En cada evaluación se eliminan todos los árboles que han alcanzado el diámetro máximo. El esquema de construcción del escenario es
1. Determinación de la clase de crecimiento (análogo al índice de sitio)
 2. Establecer los parámetros de inicio (Edad, N, G, ab_objetivo, precis_ab, d_min, d_max, peso_G, rotacion, a_liocourt)
 3. Determinar la curva diamétrica objetivo, según el criterio de De Liocourt
 4. Determinar la curva diamétrica de inicio según el modelo de distribución diamétrica citado en el modelo de monte regular. A partir de esta distribución se calculan el resto de las variables dasocráticas. Al ser un monte irregular no se cuenta con datos de Edad y Ho , por lo tanto, no se pueden emplear las ecuaciones de masa de GOFAGUS. Se utilizan tarifas de árbol individual para volumen y altura en función del diámetro, calculados a partir del 4º IFN
 5. Determinar cada año si es necesario intervenir en entresacas. Las cortas tienen lugar si se ha alcanzado el año de rotación y el área basimétrica supera el área basimétrica objetivo. La última clase se corta siempre que llega al diámetro máximo establecido (d_max).
 6. Se actualiza la curva de distribución diamétrica mediante un modelo de incremento de área basimétrica y se genera la curva y las variables antes de clara del siguiente año. Se incorporan los árboles correspondientes a la



- primera clase.
7. El cálculo de las fracciones de biomasa se realiza como en el caso de montes regulares.
 8. A partir de los datos del escenario se genera el archivo en formato “.co2” de CO2Fix. La simulación en transformación se extiende a 300 años, aproximadamente los tres turnos que se consideran en el monte regular.

Modelos Empleados en la Simulación de Montes Irregulares:

Los modelos empleados para desarrollar este escenario se describen a continuación.

- **Modelo de incremento de área basimétrica individual / Incremento diametral individual.** Se emplea el mismo modelo que en el monte regular.
- **Calidad de estación.** La modelización de monte irregular se hace desde un monte regular, caracterizado por un índice de sitio. Para trasladar el concepto de índice de sitio al modelo de monte irregular se ha optado por dividir el incremento diametral predicho en clases de crecimiento creciente. Para ello se emplean como curvas de referencia las relaciones en los cuantiles 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 0.60, para representar cinco bandas de crecimiento. La elección de estos percentiles se ha decidido tras evaluar distintas divisiones y buscar que el crecimiento generado fuera congruente con el rango de valores encontrado en los datos del IFN. Estas bandas se asimilan a las calidades de estación de montes regulares (13,16,19,22,25). La previsión de incremento de área basimétrica se corrige con el modelo de cuantiles correspondiente a la calidad de estación del monte regular del que parte la transformación. En la regresión cuantílica se ha empleado la librería quantreg de R (KOENKER, 2023).
- **Curva objetivo.** El cálculo del parámetro que define la relación entre número de árboles de clases diametrales consecutivas se ha calculado a partir de la exponencial negativa que relaciona el número de árboles por clase con el diámetro correspondiente (SERRADA HIERRO, 2011). $N_i = K e^{-qD_i}$ Donde N_i es el número de árboles con diámetro D_i y K y q son constantes. Para ajustar este modelo se han clasificado los diámetros en clases diamétricas de 5 cm. Para simular el efecto de clases diamétricas con el máximo número de árboles para cada clase, se ha ajustado la ecuación anterior mediante una regresión cuantílica al cuantil 99%. A partir del parámetro q se deduce la constante de De Liocourt para calcular la curva de equilibrio
- **Modelos de altura y volumen.** Varios de los modelos calculados en GOFAGUS no son aplicables a montes irregulares al emplear variables de masa que inicialmente dependen de la Edad de la masa. En concreto se han calculado tarifas de volumen y altura. Los datos de partida son los del IFN4, en árboles con forma de tronco definido como un único fuste (Forma de cubicación 1 a 3 del IFN4).
- **Modelo de altura:** El modelo empleado es

$$Ht \sim 1.3 + \exp(a+b/Dn)$$
- **Modelo de volumen:** Los pares de valores $Dn - Ht$ proporcionan el volumen con corteza del árbol mediante la ecuación de volumen del IFN4, que tiene la forma $VCC = a + b (D.n.)^2 * Ht$. Los parámetros a y b varían con la forma

de cubicación del árbol. A partir de los pares $D_n - V_{cc}$ se ajusta:

$$V_{cc} \sim D_n + D_n^2$$

- **Modelo de distribución diamétrica.** Se emplea el mismo modelo que en montes regulares.
- **Modelo de mortalidad.** Se cuenta con el modelo desarrollado para montes regulares, aunque en la práctica se asume que la mortalidad está incluida en las intervenciones desde que se inicia la transformación. **Estadísticos de bondad de ajuste** El análisis de la capacidad de ajuste de los diferentes modelos evaluados se basó en comparaciones numéricas y gráficas de los residuos. Se emplearon tres estadísticos ampliamente utilizados en modelización: el sesgo (e), la raíz del error medio cuadrático (REMC) y el coeficiente de determinación (R^2).

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n}$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Donde y_i , $\hat{y}_i$ e $\bar{y}$ son, respectivamente, los valores observados, predichos y medio de la variable dependiente, n es el número total de observaciones y p el número de parámetros del modelo ajustado. Los valores de e y REMC se calcularon tanto en valor real como normalizado (es decir, el porcentaje con respecto a la media de la variable dependiente).

4. Resultados

Modelos para la simulación de monte regular

- **Modelo de mortalidad dependiente de la densidad:**

El modelo ajustado es una transformación logarítmica del modelo original, SFA (stochastic frontier analysis) con la forma

$$\ln Y_i = \ln A + \sum \beta_k X_k + \varepsilon_i$$

Donde Y_i es la densidad de la parcela i , X_k son las variables independientes, en este caso el diámetro medio cuadrático (D_g), A y β_k son los parámetros que ajustar. El término ε_i corresponde al error, compuesto de dos componentes

$$\varepsilon_i = v_i - u_i$$

v_i representa el error aleatorio y sigue una distribución normal mientras que u_i sigue una distribución normal truncada a los valores positivos y representa la diferencia de la densidad media de la parcela con el valor límite que marca el inicio de la mortalidad por competencia. Para su ajuste se emplea la reparametrización de la varianza según BATTESE & CORRA (1977) (en (CHARRU et al., 2012):

$$\sigma^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2$$

$$g = \sigma_u^2 / \sigma^2$$

El ajuste del modelo $\ln(N) = \ln(A) + \beta \ln(Dg)$ se resumen en la Tabla 1. La significación de los parámetros se evalúa con una prueba Z. El estadístico g varía entre 0 y 1, valores cercanos a 1 indican que el componente asimétrico del error es significativo y existe una relación clara entre la densidad y el diámetro cuadrático medio, por lo que se concluye que hay mortalidad por densidad en la muestra ((TRIFKOVIĆ et al., 2023),(CHARRU et al., 2012).

Tabla 1. Resumen del ajuste del modelo SFA de mortalidad dependiente de la densidad

	Estimado	Error estándar	Z valor	Pr(> z)
Intercepción [ln(A)]	13.0752	0.1446	90.409	<2.2e-16 ***
β [ln(Dg)]	-1.9273	0.0421	-45.683	<2.2e-16 ***
σ^2	0.5513	0.0475	11.601	<2.2e-16 ***
g	0.9700	0.0092	104.731	<2.2e-16 ***

En la Figura 1 se puede comprobar el adecuado ajuste de la curva propuesta como límite de la densidad que implica mortalidad natural.

A la vista de los resultados, el modelo se puede considerar útil para el objetivo buscado, aunque en los diámetros inferiores a 15 cm hay pocos datos y debe tenerse en cuenta a la hora de aplicarlo en las simulaciones.

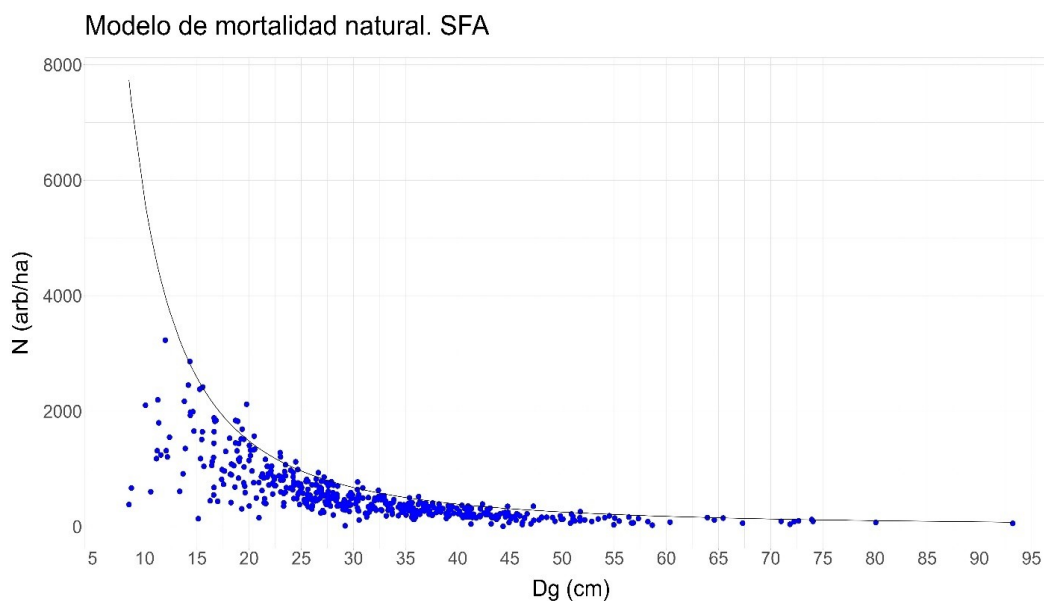


Figura 1. Representación gráfica del modelo de la mortalidad por densidad

- Modelo de mortalidad independiente de la densidad:**

El cómputo del porcentaje de árboles muertos se realiza sobre la base de datos empleada en el modelo SFA, con los mismos filtros. El objetivo es caracterizar parcelas monoespecíficas y gestionadas hacia una cobertura prácticamente completa (FCC $\geq$ 90%). En algunas parcelas no estaban disponibles los datos de fecha de medición, por lo que no se han incluido. Se prioriza la fiabilidad de las mediciones a la cantidad de datos.

La media de mortalidad en 5 años es 2,492%, con mínimo de 0,0% y máximo de 33,166%. En la Figura 2 se observa que la distribución de esta variable es notablemente asimétrica por lo que el valor medio se debe considerar como una aproximación teórica para modelizar el efecto de la mortalidad sobre el balance de carbono.

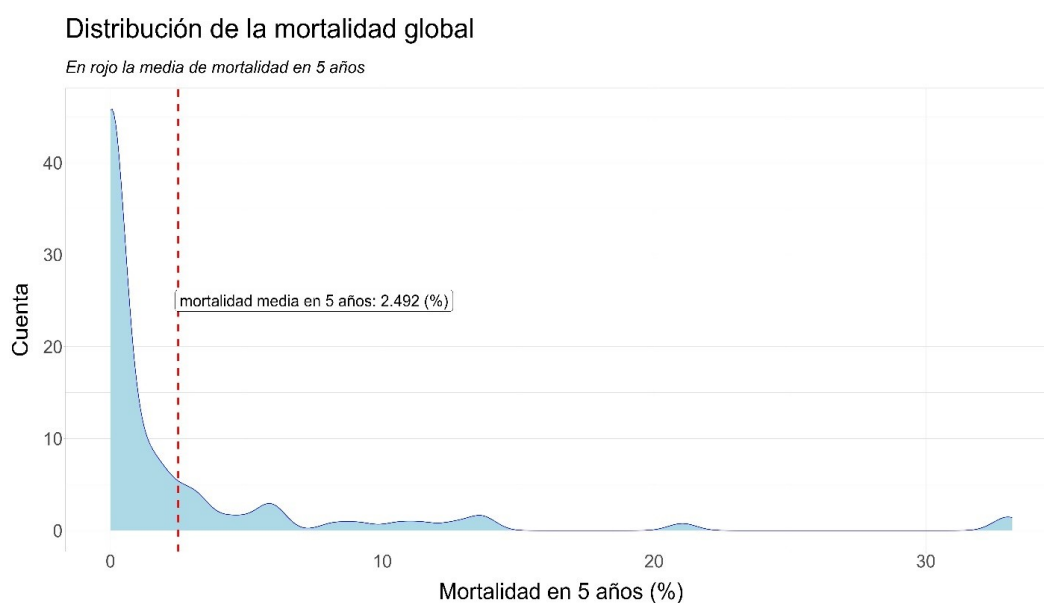


Figura 2. Distribución del porcentaje de mortalidad en 5 años las parcelas analizadas

- **Incremento en área basimétrica individual:**

El modelo propuesto es

$$ba = \exp(b_1 * V_1 + \dots + b_n * V_n) + \varepsilon_i$$

donde ba es el incremento en área basimétrica ($\text{cm}^2/\text{año}$), V_i son las variables dasométricas y dasocráticas explicativas, b_i son parámetros que ajustar y ε_i es el término de error. Se han probado combinaciones de las variables explicativas y sus transformaciones. El mejor ajuste se consigue con la siguiente combinación:

$$ba = \exp(b_1 Dn_ifn3 + b_2 \log(Dn_ifn3) + b_3 Dn_ifn3^2 + b_4 ab_ifn3 + b_5 ab_may_ifn3) + \varepsilon_{pi.mlmay}$$

donde Dn_ifn3 es el diámetro normal del árbol medido en el IFN3, ab_ifn3 es el área basimétrica de la parcela y ab_may_ifn3 es el área basimétrica de los árboles con diámetro superior al modelizado.

Los datos anómalos por clases diamétricas y percentiles alcanzan un 20% de los originales.

En la Tabla 2 se resumen los estadísticos que caracterizan el incremento anual del área basimétrica.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos del incremento anual en área basimétrica ($\text{cm}^2/\text{año}$)

Min	1º cuartil	Mediana	Media	3º cuartil	Max	Desv
0.3086	3.9673	7.5347	10.7062	13.6255	129.0832	11.0100

Los resultados del ajuste se resumen en la Tabla 3 y en la Figura 3. Los estadísticos de ajuste se recogen en la Tabla 4.

Tabla 3. Estimación de parámetros y contrastes de significación aproximados en el ajuste del modelo de incremento de área basimétrica ($\text{cm}^2/\text{años}$)

Parámetro	Estimación	Error estándar aprox.	t - valor	Prob (> t) aprox.
b1	7.611e-02	5.564e-03	13.679	< 2e-16
b2	1.867e-01	4.940e-02	3.780	0.000161
b3	-4.551e-04	3.968e-05	-11.469	< 2e-16
b4	-8.508e-03	1.382e-03	-6.157	8.85e-10
b5	-7.747e-03	1.726e-03	-4.490	7.52e-06

Tabla 4. Estadísticos de bondad de ajuste del modelo de incremento anual en área basimétrica individual ($\text{cm}^2/\text{año}$)

e	e (%)	REMC	REMC (%)	R2
0.1056	0.9863	6.975	65.102	60.00

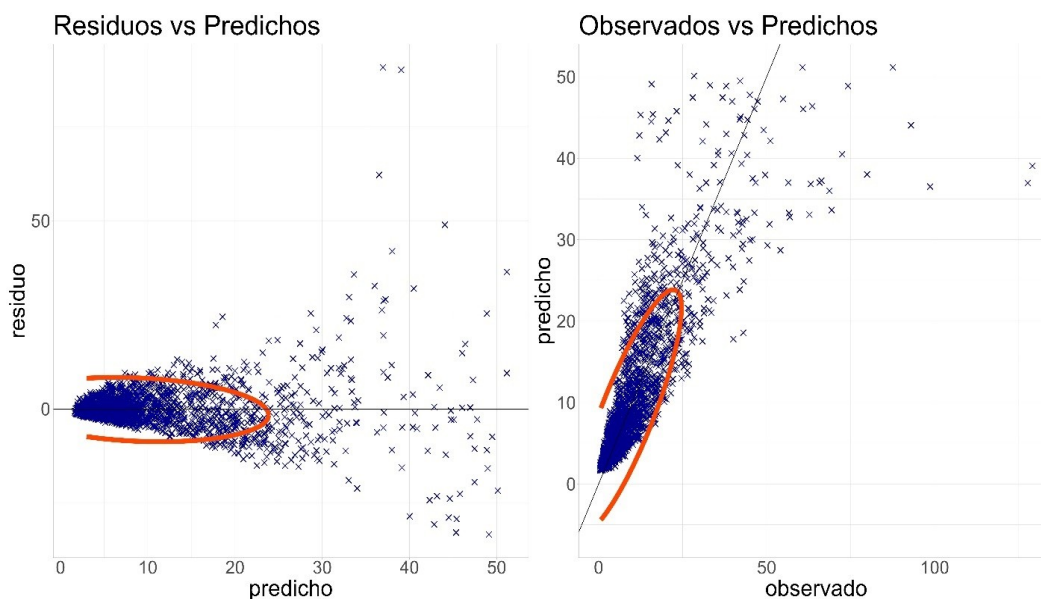


Figura 3. Gráficos de ajuste de modelo de incremento anual en área basimétrica individual. La elipse representa el 95% de los datos.

Respecto a la calidad del modelo, se observa que no es sesgado y la estimación de los parámetros es correcta, pero en las gráficas y en los estadísticos RMEC y R^2 se observa que los residuos son elevados. A pesar de esta observación se considera que el modelo es útil porque los datos que se alejan de la predicción son minoría, según se identifica con las elipses de confianza de la Figura 3.

- **Modelo de distribución diamétrica:**

Se sigue el procedimiento detallado en (GORGOSO-VARELA et al., 2021). La distribución de diámetros se ajusta a una función de distribución de la probabilidad de Weibull

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}$$

en la que $f(x)$ es la distribución de probabilidad de los árboles con un diámetro c , a es el parámetro de posición, b el de escala y c el de forma.

El parámetro a es el diámetro mínimo inventariado. En el caso de masas regulares se le asigna un valor de 5 cm al inicio de la simulación y posteriormente en cada paso se calcula como una relación con el diámetro medio cuadrático. Para modelizar esta relación se ha estudiado la inclusión de distintas variables de masa en un modelo lineal, según la propuesta de (GAZTELURRUTIA & GONZÁLEZ, 2001), pero la única variable significativa es Dg . Los datos para el modelo son los empleados en el modelo de incremento de área basimétrica restringidos a las masas regulares.

El modelo de diámetro mínimo toma los valores de la Tabla 5 los estadísticos de ajuste de la Tabla 6.

$$D_{\min} = \ln t + \beta Dg + \varepsilon$$

Tabla 5. Estimación de parámetros y contrastes de significación aproximados en el ajuste del modelo de diámetro mínimo (cm)

Parámetro	Estimación	Error estándar aprox.	t - valor	Prob (> t) aprox.
-----------	------------	-----------------------	-----------	---------------------

Int	0.35653	2.22134	0.161	0.874
β	0.49371	0.07382	6.688	6.44e-07

Tabla 6. Estadísticos de bondad de ajuste del modelo del diámetro mínimo (cm)

REMC	REMC (%)	R ²
4.106	28.912	65.08

A pesar de que el parámetro de intersección no es significativo se conserva para evitar distorsión en el cálculo del parámetro β .

Los parámetros b y c se calculan resolviendo las siguientes ecuaciones

$$b = \frac{d_m - a}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right)}$$

$$\sigma^2 = \frac{(d_m - a)^2}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{c}\right)} \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{c}\right) \right]$$

donde d_m es el diámetro medio, σ^2 es la varianza y $\Gamma(\cdot)$ es la función gamma. La ecuación. La última ecuación se resuelve mediante el método de bisección. El diámetro medio se emplea en las ecuaciones anteriores y en el cálculo de la varianza.

$$\sigma^2 = d_g^2 - d_m^2$$

El diámetro medio se estima mediante la siguiente ecuación desarrollada en el proyecto GOFAGUS.

$$d_m = \exp(0.1914 - 0.00062 \cdot N + 0.01666 \cdot G)$$

Los parámetros a, b y c de la función de Weibull se calculan para cada año de la simulación una vez actualizados las extracciones y los crecimientos.

Modelos para la simulación de monte irregular

- Modelo de simulación de calidad de estación para monte irregular:**

Se asume que las diferencias de crecimiento que implican las calidades de estación de montes regulares se reflejan en diferencias de crecimiento en área basimétrica. Las diferencias en este crecimiento se estiman mediante correcciones de la previsión del modelo de incremento de área basimétrica. Estas correcciones corresponden a 5 regresiones cuantílicas, una por calidad de estación (Tabla 7).

En la Figura 4 se representan estas regresiones. No se considera de interés la calidad del ajuste porque se trata de una corrección cuya precisión no es posible evaluar.

Tabla 7. Ecuaciones de corrección de la predicción del incremento anual en área basimétrica

Calidad	Cuantil	Intersección	Pendiente
---------	---------	--------------	-----------

13	40%	0.02335933	0.8448640
16	45%	0.20179683	0.8725244
19	50%	0.31471232	0.9042875
22	55%	0.36080394	0.9567681
25	60%	0.45240264	0.9999346

Rectas de regresión cuantílica. Predicción del incremento en área basimétrica

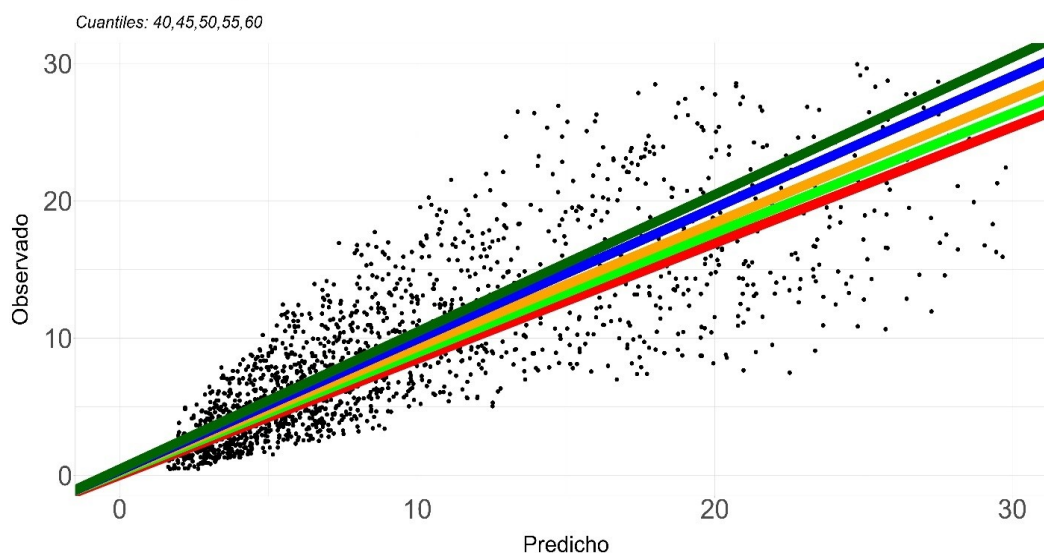


Figura 4. Rectas de regresión para corregir la predicción de incremento de área basimétrica en función de la calidad de estación del monte regular. Verde oscuro: regresión cuantil 60, azul: regresión cuantil 55, naranja: regresión cuantil 50, verde claro: regresión cuantil 45, rojo: regresión cuantil 40.

- **Curva de equilibrio:**

Para estimar la progresión geométrica entre clases se agrupan los árboles en clases de 5 cm y se ajusta una regresión cuantílica al cuantil 99%, transformada mediante el logaritmo. Para seleccionar el cuantil que mejor representa la densidad máxima por clase diamétrica se han evaluado varias alternativas gráficamente y parece necesario llegar hasta el 99% para ajustarse a los valores máximos (Figura 5).

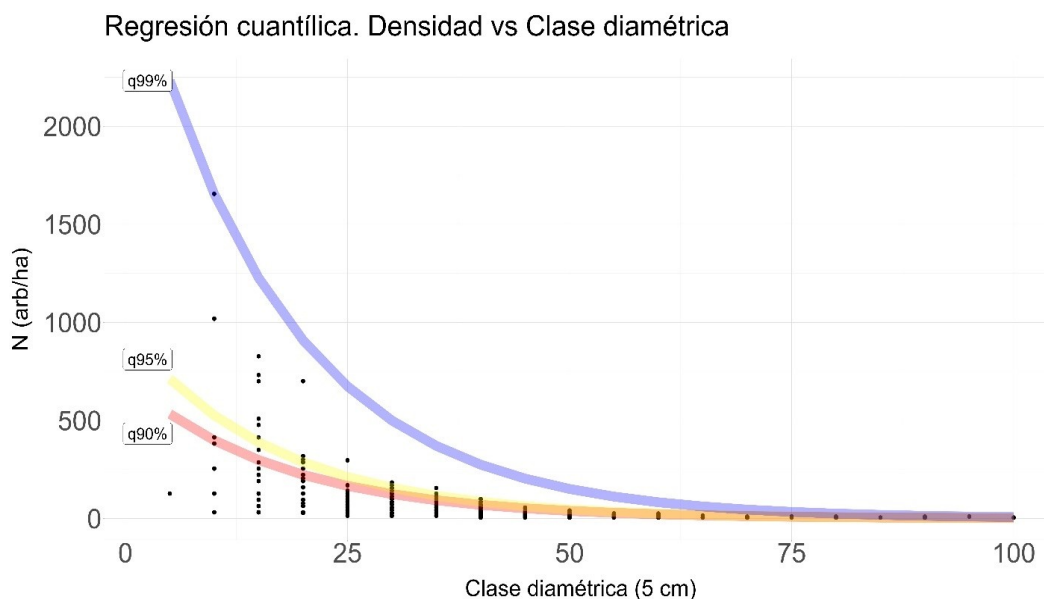


Figura 5. Ajuste por regresión cuantílica de la relación entre clase diamétrica y densidad para los cuantiles 90%, 95% y 99%

El resultado de ajustar esta curva es una estimación de la constante de DE LIOCOURT de 1.349119. Este valor es muy próximo al que se propone en el modelo H4 de GO FAGUS (pp. 168, ((GRUPO OPERATIVO FAGUS, 2023) Este valor es una estimación propuesta a partir de los datos del IFN, pero está sujeto a ser modificado en los escenarios correspondientes a requerimiento del cliente.

- **Tarifa de altura y volumen:**

- Tarifa de altura: Los datos de partida son los del IFN4, en árboles con forma de tronco definido como un único fuste (Forma de cubicación 1 a 3 del IFN4). La variabilidad en la altura es elevada y se cuenta con más de 45000 pares de valores Dn-Ht en las provincias seleccionadas. Para disminuir la suma de residuos y mejorar la utilidad del modelo se ha limitado el análisis a los árboles de Navarra, optando por las hayas que previsiblemente mejor describen el efecto de la selvicultura sobre la relación altura – diámetro. Se han probado varias ecuaciones de trabajos clásicos y se ha seleccionado la siguiente ecuación. Los parámetros ajustados y los estadísticos del ajuste se resumen en las Tablas 8 y 9.

$$H_t = 1,3 + \exp(\beta_1 + \beta_2/Dn) + \varepsilon$$

Tabla 8. Estimación de parámetros y contrastes de significación aproximados en el ajuste del modelo de altura (m) - diámetro (cm)

Parámetro	Estimación	Error estándar aprox.	t - valor	Prob (> t) aprox.
β_1	3.42568	0.00328	1044.6	<2e-16
β_2	-14.23484	0.10080	-141.2	<2e-16

Tabla 9. Estadísticos de bondad de ajuste del modelo de altura (m) - diámetro (cm)

REMC	REMC (%)	R ²
4.144	20.764	54.14

- Tarifa de volumen: La ecuación de volumen ajustada tiene la forma

$$V_{cc} = Int + \beta_1 Dn + \beta_2 Dn^2 + \varepsilon$$

donde V_{cc} es el Volumen con corteza (dm³) calculado mediante la ecuación correspondiente del IFN4 a partir de Dn y Ht. Los parámetros de la ecuación y los estadísticos de ajuste se recogen en las Tablas 10 y 11.

Tabla 10. Estimación de parámetros y contrastes de significación aproximados en el ajuste del modelo de volumen con corteza (dm³) – diámetro (mm)

Parámetro	Estimación	Error estándar aprox.	t - valor	Prob (> t) aprox.
Int	1.003e+02	6.099e+00	16.45	<2e-16
β_1	-9.745e-01	3.114e-02	-31.30	<2e-16
β_2	8.005e-03	3.617e-05	221.33	<2e-16

Tabla 11. Estadísticos de bondad de ajuste del modelo volumen con corteza (dm³) – diámetro (mm)

REMC	REMC (%)	R ²
4.144	20.764	54.14

Ejemplo de la aplicación de los modelos

En las Figuras 6, 7 y 8 se presentan algunos ejemplos de la evolución del volumen (m³/ha) simulado.

Para valorar la verosimilitud de los escenarios planteados, el Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Rural del Gobierno de Navarra ha facilitado dos fuentes de datos, una base de datos con información dasocrática de montes de haya ordenados y

los resultados del seguimiento de los ensayos de claras establecidos en Navarra (MADRIGAL Madrigal et al., 1992), (Gobierno de Navarra et al., n.d.). Se han empleado los datos dasocráticos antes de la clara en dos intervenciones en las tres localizaciones del ensayo: Legua Acotada, Aralar y Txangoa. Los tratamientos son

- - Tratamiento A: Testigo sin tratamiento
 - Tratamiento B: Clara baja moderada
 - Tratamiento C: Clara baja fuerte, incluso mixta
 - Tratamiento D: Clara mixta con selección de árboles de porvenir

Grupo: prueba_2
Escenario: madrigal_ref_IS19_alta

Línea: Evolución de Vcc m3/ha. Puntos azules: Datos de ordenaciones. Inicio: 7000 arb/ha

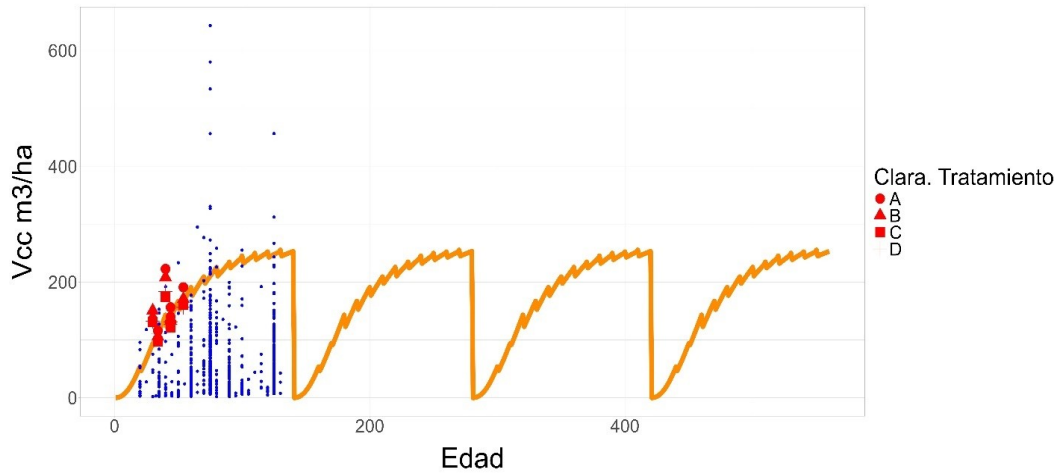


Figura 6. Ejemplo de simulación para gestión de monte regular

Grupo: go_fagus
Escenario: H2_IS22_alta

Línea: Evolución de Vcc m3/ha. Puntos azules: Datos de ordenaciones. Inicio: 6381 arb/ha

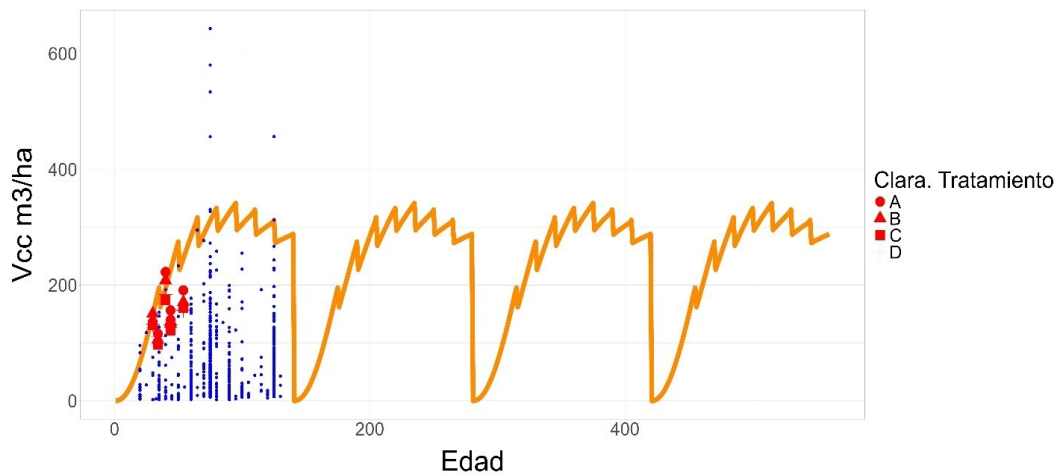


Figura 7. Ejemplo de simulación para gestión de monte regular

Grupo: transformacion

Escenario: madrigal_ref_IS22_alta_D_E_70_N_597_IS_22_DMx_6

Línea: Evolución de Vcc m3/ha. Puntos azules: Datos de ordenaciones

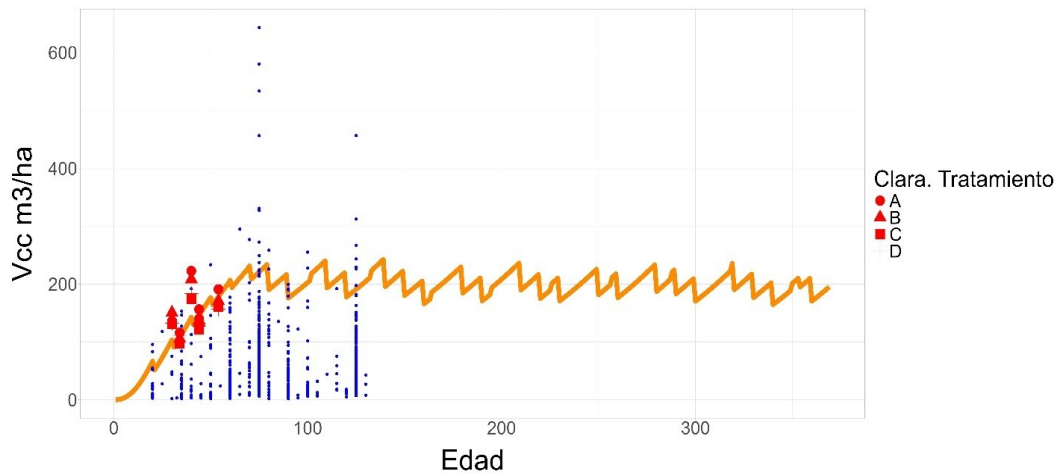


Figura 8. Ejemplo de simulación para transformación a monte irregular

5. Discusión

6.

La Unión Europea tiene como objetivo la neutralidad climática en 2050 y la gestión forestal es una de las vías para compensar las emisiones de sectores difíciles de descarbonizar (UE, 2025). A pesar de que la contribución de los bosques como sumidero de carbono es incuestionable, se busca optimizar la cantidad de carbono fijado. (CHITI et al., 2024) indican algunas de las vías en las que la gestión forestal puede aumentar la fijación de carbono, entre ellas alargar el turno, reducir el volumen de corta, convertir monte bajo a monte alto y gestionar hacia sistemas de cobertura continua. Estas recomendaciones tienen como objetivo aumentar el carbono en el suelo y retrasar la movilización de carbono que siempre supone una extracción de madera. Por otra parte, distintos grados de intensidad en la gestión permiten la fijación de carbono en productos de larga duración, disminuir el riesgo de incendios y vincular a la población con la conservación de los montes. AMERAY et al. (2021) resumen en tres escenarios el papel de la gestión forestal en el secuestro de carbono: gestión centrada en la conservación, gestión extensiva y gestión intensiva. El carbono fijado en suelo y biomasa es mayor en el primer caso, mientras que distintos grados de gestión permiten que parte del carbono permanezca en productos de distinta duración antes de que el carbono se incorpore a la atmósfera. Estos autores concluyen que la optimización del balance del carbono debe integrar la gestión, la conservación y la industria. Conseguir este objetivo es complejo por la diversidad de ecosistemas y condicionantes en los que está implicada la gestión forestal. En los últimos años se multiplican las publicaciones que buscan aportar conocimiento científico y aportar soluciones técnicas (p.e. GIASSON et al. (2023), ONTL et al (2020), PUKKALA, 2018).

Implementar estas alternativas supone tomar múltiples decisiones con implicaciones que se extienden durante varios años. Los modelos desarrollados dentro del proyecto GESTFOREST permiten explorar el efecto de estas decisiones en términos de balance de carbono para una especie en un área



concreta. El haya en el Pirineo cuenta con varios itinerarios de gestión, elaborados en su mayor parte por los grupos que participan en GestForest -CENTRE NATIONAL DE LA PROPIÉTÉ FORESTIÈRE (2020), GRUPO OPERATIVO FAGUS (2023), SERVICIO DE MONTES. GOBIERNO DE NAVARRA & GAN-NIK (2015), OFFICE NATIONAL DES FORÊTS & FUNDACIÓN HAZI (2022), MADRIGAL et al. (1992)-. Para conseguir que estos itinerarios se puedan evaluar como balance de carbono en el modelo CO2FIX, se deben implementar un conjunto de submodelos, que contemplen el efecto de distintos calendarios de intervenciones. Además, hay que definir la línea base, modelizar la alternativa de “no gestión” y la transformación desde la habitual gestión en monte regular hacia el monte irregular para explorar el mayor número de alternativas de gestión.

Modelización

El Inventario Forestal Nacional se ha empleado en numerosos trabajos para construir las diferentes ecuaciones que componen un modelo de producción (p.e. BRAVO y MONTERO (1997), BRAVO et al. (2002)). En este trabajo es la base para construir varios de los submodelos necesarios y permite convertir itinerarios selvícolas en alternativas evaluables en CO2FIX. En particular se usa en la elaboración de los modelos de distribución diamétrica, incremento diametral, mortalidad dependiente de la densidad, mortalidad independiente de la densidad, y curva diamétrica objetivo según el criterio de De Liocourt. La elaboración de ecuaciones específicas para el haya en el Pirineo permite simular fácilmente los cientos de alternativas analizadas en GestForest mediante programación. Hay que indicar que, en un entorno más restringido de alternativas, herramientas de simulación selvícola como SIMANFOR (BRAVO et al., 2025) pueden generar las salidas necesarias para CO2FIX.

Línea base

En el estudio del balance de carbono se comparan distintas alternativas de gestión con el sistema de manejo habitual (SCHELHAAS et al. 2004). La dificultad de establecer la línea base está en la variedad de alternativas propuestas en una superficie tan extensa como la que ocupa el haya en las regiones incluidas en GestForest. Además, también varían a lo largo del tiempo en función de las demandas de la sociedad, la capacidad presupuestaria de los propietarios, la variabilidad climática, etc. Entre las alternativas evaluadas se han propuesto como línea base los itinerarios H1 o H2 de GoFagus (GRUPO OPERATIVO FAGUS, 2023) ya que son escenarios orientados a la producción de madera, en cuanto a que sus objetivos se centran en las características tecnológicas y dimensiones, con pocas intervenciones selvícolas para minimizar los costes. Se ajusta razonablemente a la tendencia actual, según una consulta a técnicos del Gobierno de Navarra encargados de la gestión de hayedos. En particular, se propone H2 que contabiliza el mayor volumen medio para la clase media (IS19) y por lo tanto no genera artificialmente un nivel bajo de biomasa en la línea base que crearía falsos incrementos de carbono.

Alternativa de no gestión

No gestionar es un escenario de alta capacidad de fijación de carbono. También es un escenario de alto riesgo de pérdidas de carbono por incendios, secas o vendavales. Hay varios autores que consideran que la no gestión es en general más favorable que la gestión para la fijación de carbono porque el efecto sumidero en



madera en pie, madera muerta e incorporación al suelo supera al del incremento del crecimiento que conlleva la selvicultura, aunque es un tema complejo y depende de muchos factores (GRATANI et al., 2018, ROEBROEK et al., 2023, PUKKALA, 2018), aunque otros trabajos apuntan en la dirección contraria. SEVILLANO et al. (2025) encuentran que en bosque boreales los clareos y la reforestación tras la corta final incrementan notablemente la fijación de carbono. En cualquier caso, la no gestión implica la renuncia a producir un material renovable que fija carbono y va a substituir a otros productos emisores netos de carbono en su fabricación, por lo que tiene un interés más bien teórico dentro de los objetivos de GestForest.

MARTIN-BENITO et al. (2022) analizan la evolución de dos masas de haya y abeto en el Pirineo, tras 200 años sin gestión y encuentran que el crecimiento corriente de la biomasa sigue aumentando. En el escenario de “no gestión” analizado en este trabajo, la tendencia del crecimiento corriente es similar, aunque ligeramente decreciente en el largo plazo. Probablemente si se añadiera la incorporación de masa asociada al efecto de eventos aleatorios de apertura de la masa se produciría un escenario de altibajos con una media móvil aproximadamente constante o ligeramente creciente.

Resultados en monte regular

Los itinerarios analizados son en su mayor parte sobre montes regulares. Los principales factores que van a afectar al balance de carbono en estas masas son la frecuencia e intensidad de las intervenciones, el momento de inicio de las intervenciones selvícola y el diámetro normal de los árboles objetivo.

Transformación de monte regular a monte irregular

En el trabajo de (ONTL et al., 2020) se recogen recomendaciones generales para orientar la selvicultura a la captación de carbono. Una de ellas es “Aumentar la frecuencia o intensidad de la cosecha debido a un mayor riesgo de mortalidad de los árboles.” Los mejores resultados en balance de carbono estimado en GestForest se consiguen en cierto sentido aplicando este criterio, dentro de un esquema de monte irregular. En esta línea, KRUG (2019) encuentra que la presencia de diámetros de todas las clases mejora la eficiencia en la utilización de los recursos disponibles por las hayas y mejora la productividad, y por lo tanto la fijación de carbono.

Calculadora

El conjunto de resultados se incorpora a una aplicación web en forma de calculadora: <https://www.gan-nik.es/es/proyectos-europeos/gestforest-co2> Para ello se ha construido una calculadora que permite evaluar los numerosos itinerarios existentes para el haya, manejando los cambios en la programación e intensidad de las intervenciones junto con numerosos parámetros selvícolas que van a afectar a la cantidad de carbono fijado (turno, volumen mínimo de corta, área basimétrica objetivo, edad de inicio del paso a monte irregular, etc)

La implementación de esta calculadora para contabilizar la adicionalidad en el balance de carbono de cada uno de los itinerarios permite la comparación de alternativas, tanto en cantidad de carbono fijado como en valor monetario en los



créditos asociados. Esta solución facilita a los técnicos, propietario y políticos la aplicación de la metodología de CO2FIX sin pasar por el esquema de preparación de archivos específicos y la modelización previa de todos los procesos implicados en la gestión dinámica de los hayedos. Además, la herramienta ofrece los datos de las variables selvícolas de los itinerarios, como herramienta para establecer un programa de monitorización que permita realizar los cálculos necesarios para validar los créditos de carbono.

6. Conclusiones

El Inventario Forestal Nacional suministra la información necesaria para convertir los itinerarios selvícolas del haya en modelos dinámicos que pueden ser evaluados en cientos de escenarios y valorados en carbono fijado.

Los modelos elaborados abarcan los escenarios de monte regular, la transformación a monte irregular y la “no gestión”.

Aunque en este trabajo no se busca establecer la adecuación de los distintos itinerarios ni su orden en cuanto a carbono fijado o créditos conseguidos, se puede señalar la adecuación de la transformación a monte irregular y la congruencia de los modelos generados con los resultados de la red de claras de hayedos gestionada por el Gobierno de Navarra.

Por último, la presentación de estos resultados en forma de una calculadora es una vía sencilla para cualquier persona interesada en analizar y valorar la fijación de carbono mediante la gestión forestal.

7. Agradecimientos

Dr. Juan Antonio Blanco Vaca. Departamento de Ciencias. Área de Ecología. Universidad Pública de Navarra

8. Bibliografía

- AIGNER, D.; LOVELL, C. A. K.; SCHMIDT, P.; 2023. Reprint of: Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 234, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2023.01.023>
- AMERAY, A.; BERGERON, Y.; VALERIA, O.; MONTORO, M.; CAVARD, X.; 2021. Forest carbon management: a review of silvicultural practices and management strategies across boreal, temperate and tropical forests. *Current Forestry Reports*, 7, 245-266. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00151-w>
- BARTELINK, H. H.; 1997. Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L). *Annales Des Sciences Forestières*, 54(1), 39-50. <https://doi.org/10.1051/forest:19970104>
- BIANCHI, S.; SIIPILEHTO, J.; REPOLA, J.; NIEMISTO, P.; KORHONEN, K.; PELTONIEMI, M.; SALMINEN, H.; HYNYNEN, J.; 2023. Individual tree basal area increment models suitable for different stand structures in Finland. *Forest Ecology and Management*, 549, 121467. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121467>
- BRAVO, F.; DEL RÍO, M.; DEL PESO, C.; 2002. El inventario forestal nacional : elemento clave para la gestión forestal sostenible. Seminario Científico-Técnico sobre el Inventario Forestal Nacional. Universidad de Valladolid, Fundación General. 191 pp.
- BRAVO, F.; MONTERO, G.; 1997. Aplicación de los datos del segundo inventario forestal nacional a la elaboración de un modelo de crecimiento y producción para *Pinus sylvestris* en el Alto Ebro. Libro de actas del I Congreso Forestal Hispano-



- Luso, IRATI'97 Mesa temática 4, pp. 125-130.
- BRAVO, F.; ORDÓÑEZ, C.; VÁZQUEZ-VELOSO, A.; MICHALAKOPOULOS, S.; 2025. SIMANFOR cloud Decision Support System: Structure, content, and applications. *Ecological Modelling*, 499, 110912. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110912>
- CENTRE NATIONAL DE LA PROPIÉTÉ FORESTIÈRE, C.; 2020. Itinéraires techniques de *Fagus sylvatica*. <https://www.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/hetre.pdf>
- CHARRU, M.; SEYNAVE, I.; MORNEAU, F.; RIVOIRE, M.; BONTEMPS, J.-D.; 2012. Significant differences and curvilinearity in the self-thinning relationships of 11 temperate tree species assessed from forest inventory data. *Annals of Forest Science*, 69(2), Article 2. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0149-0>
- CHITI, T.; REY, A.; ABILDTRUP, J.; BÖTTCHER, H.; DIACI, J.; FRINGS, O.; LEHTONEN, A.; SCHINDLBACHER, A.; ZAVALA, M. A.; EUROPEAN FOREST INSTITUTE; WUNDER, S.; 2024. Carbon farming in the European forestry sector (From Science to Policy) [From Science to Policy]. European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/fs17>
- COELLI, T.; HENNINGSEN, A.; 2020. frontier: Stochastic Frontier Analysis. <https://CRAN.R-Project.org/package=frontier>
- ELZHOV, T. V.; MULLEN, K. M.; SPIESS, A.-N.; BOLKER, B.; 2023. minpack.lm: R Interface to the Levenberg-Marquardt Nonlinear Least-Squares Algorithm Found in MINPACK, Plus Support for Bounds. <https://CRAN.R-project.org/package=minpack.lm>
- GAZTELURRUTIA, M. R.; GONZÁLEZ, G. M.; 2001. Modelo de simulación de claras en masas de *Pinus sylvestris* L. Instituto nacional de investigación y tecnología agraria y alimentaria. https://books.google.es/books?id=B1t_wgEACAAJ
- GERTRUDIX, R. R.-P.; MONTERO, G.; RIO, M. del.; 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, 21(1), Article 1. <https://doi.org/10.5424/fs/2112211-02193>
- GIASSON, L.-A.; THIFFAULT, E.; LEBEL, L.; CARLE, J.-F.; 2023- Carbon balance of forest management and wood production in the boreal forest of Quebec (Canada). *Front. For. Glob. Change* 6:1242218. doi: 10.3389/ffgc.2023.1242218
- GORGOSO-VARELA, J. J.; PONCE, R. A.; RODRÍGUEZ-PUERTA, F.; 2021. Modeling Diameter Distributions with Six Probability Density Functions in *Pinus halepensis* Mill. Plantations Using Low-Density Airborne Laser Scanning Data in Aragón (Northeast Spain). *Remote Sensing*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/rs13122307>
- GRATANI, L.; DI MARTINO, L.; FRATTAROLI, A.R.; BONITO, A.; DI CECCO, V.; DE SIMONE, W.; FERELLA, G.; CATONI, R.; 2018. Carbon sequestration capability of *Fagus sylvatica* forests developing in the Majella National Park (Central Apennines, Italy). *J. For. Res.* 29, 1627–1634
- GRUPO OPERATIVO FAGUS.; 2023. Resultado finales del proyecto Grupo Operativo FAGUS. https://www.gofagus.es/sites/default/files/manual_resultados_go_fagus.pdf
- KOENKER, R.; 2023. quantreg: Quantile Regression. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>
- KRUG, J.H.A.; 2019. How can forest management increase biomass accumulation and CO2 sequestration? A case study on beech forests in Hesse, Germany. *Carbon Balance Manage* 14, 17
- MADRIGAL, A.; GOBIERNO DE NAVARRA * FONDO DE PUBLICACIONES; PUERTAS, F.; MILLÁN, J. M.; NAVARRA (COMUNIDAD AUTÓNOMA) DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA, G. y M.; 1992. Tablas de Produccion Para *Fagus sylvatica* l en Navarra. Gobierno de Navarra * Fondo de Publicaciones. <https://books.google.es/books?id=pFvuAAAACAAJ>



- MARTIN-BENITO, D.; MOLINA-VALERO, J.A.; PÉREZ-CRUZADO, C.; BIGLER, C.; BUGMANN, H.; 2022. Development and long-term dynamics of old-growth beech-fir forests in the Pyrenees: Evidence from dendroecology and dynamic vegetation modelling. *For. Ecol. Manag.* 524, 120541. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120541>
- MASERA, O. R.; GARZA-CALIGARIS, J. F.; KANNINEN, M.; KARJALAINEN, T.; LISKI, J.; NABUURS, G. J.; PUSSINEN, A.; DE JONG, B. H. J.; MOHREN, G. M. J.; 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*, 164(2), 177-199. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00419-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00419-2)
- MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M.; 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. INIA - Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. <https://books.google.es/books?id=-VpKswEACAAJ>
- OFFICE NATIONAL DES FORÊTS; FUNDACIÓN HAZI.; 2022. GUÍA DE LA SELVICULTURA DEL HAYA - MACIZO PIRENAICO.
- ONTL, T.A.; JANOWIAK, M.K.; SWANSTON, C.W.; DALEY, J.; HANDLER, S.; CORNETT, M.; HAGENBUCH, S.; HANDRICK, C.; MCCARTHY, L.; PATCH, N.; 2020. Forest Management for Carbon Sequestration and Climate Adaptation. *J. For.* 118, 86–101. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvz062>
- PUKKALA, T.; 2018. Carbon forestry is surprising. *For. Ecosyst.* 5, 11. <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0131-5>
- R CORE TEAM.; 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- ROEBROEK, C.T.J.; DUVEILLER, G.; SENEVIRATNE, S.I.; DAVIN, E.L.; CESCATTI, A.; 2023. Releasing global forests from human management: How much more carbon could be stored? *Science* 380, 749–753. <https://doi.org/10.1126/science.add5878>
- SCHELHAAS, M. J.; VAN ESCH, P. W.; GROEN, T. A.; DE JONG, B. H. J.; KANNINEN, M.; LISKI, J.; MASERA, O.; MOHREN, G. M. J.; NABUURS, G. J.; PALOSUO, T.; PEDRONI, L.; VALLEJO, A.; VILÉN, T.; 2004. CO2FIX V 3.1 - A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. ALTERRA Report 1068. Wageningen, The Netherlands.
- SERRADA HIERRO, R.; 2011. Apuntes de selvicultura. Fundación Conde del Valle de Salazar.
- SERVICIO DE MONTES. GOBIERNO DE NAVARRA; GAN-NIK.; 2015. Plan General Comarca Pirenaica. https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/ACCCD512-309A-4408-969C-A8972FB1F7E8/337762/PF_Pirenaica_2_2_2016.pdf
- SEVILLANO, I.; ANTÓN-FERNÁNDEZ, C.; SØGAARD, G.; ASTRUP, R.; 2025. Improved forest management for increased carbon sequestration: An assessment of the most prominent approaches in Norway. *Journal of Environmental Management* 375 124333. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124333>
- TRIFKOVIĆ, V.; BONČINA, A.; FICKO, A.; 2023. Density-dependent mortality models for mono- and multi-species uneven-aged stands: The role of species mixture. *Forest Ecology and Management*, 545, 121260. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121260>
- UE.; 2025. Accedió en abril 2025. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en