2025 | 16·20
GIJÓN | JUNIO
9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1499

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

Organiza

Balance de carbono en bosques de pino mediterráneos bajo distintos escenarios de gestión y climáticos: un enfoque integrador

MARQUES, A. (1), CERVERA, T. (2), BAIGES, T. (2), CASALS, P. (3), BELTRÁN, M. (3), COLL, L. (1,3), DE CÁCERES, M (4), MORÁN-ORDÓÑEZ (5), AMEZTEGUI, A. (1,3).

1. Universitat de Lleida. Departamento de Ciencia e Ingeniería Forestal y Agrícola. Adaptive Management and Forest Dynamics Research Group (*ADAPTAFOR*)
2. Centre de la Propietat Forestal (CPF)
3. Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)
4. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)
5. University of Basel

Resumen

Una estrategia clave para mitigar el cambio climático y su presión sobre los bosques es la gestión forestal. Una adecuada gestión contribuye al mantenimiento de las tasas de secuestro de carbono, minimiza las pérdidas por perturbaciones, y facilita la sustitución de combustibles y materiales fósiles al producir materias primas renovables. Aunque resulta crucial evaluar el impacto de distintos enfoques de gestión sobre los flujos de carbono, la mayoría de los estudios se ciñen a una parte del proceso o un producto específico. Presentamos aquí una estimación detallada de los flujos de carbono en pinares mediterráneos bajo diferentes escenarios climáticos y de gestión, basada en simulaciones de dinámica y el método de ganancia-perdida. Esta aproximación incluye el secuestro derivado del crecimiento y la generación de diversos productos maderables; y las emisiones derivadas de las operaciones de corta y transporte y por descomposición de madera muerta y restos de corta. Los resultados muestran cómo una gestión más intensiva resulta en balances de carbono negativos, derivados de la poca vida útil de los productos generados y la alta recurrencia de trabajos forestales. Escenarios de turnos largos permiten en cambio generar productos con mayor vida útil y resultan en balances positivos a largo plazo.

Palabras clave

Balance de carbono, gestión forestal, crédito climático, escenarios, Bosque Mediterráneo

1. Introducción

Las soluciones basadas en la naturaleza son una estrategia clave para mitigar los efectos del cambio climático, con el potencial de contribuir hasta un 37% a los objetivos globales de reducción de emisiones para 2030 (GRISCOM et al., 2017). Los bosques desempeñan un papel central en esta estrategia gracias a su capacidad para secuestrar carbono y regular servicios ecosistémicos (VERKERK et al., 2022). En particular, los bosques mediterráneos son un foco de biodiversidad y almacén de carbono, representando el 1,7% del stock global de carbono forestal (FAO, 2018). En Cataluña, por ejemplo, se ha estimado que los bosques secuestran hasta el 10% de las emisiones anuales de CO_2 (CERVERA et al., 2022), por lo que actúan como un factor fundamental en la consecución de las metas de sostenibilidad y neutralidad de carbono.

Sin embargo, el ámbito Mediterráneo enfrenta amenazas significativas debido al cambio climático y al historial de legados derivados de la actividad antrópica, lo

que podría alterar su capacidad de proveer bienes y servicios (LECINA-DÍAZ et al., 2024). Según el IPCC, se prevé que para el año 2100 la temperatura media anual aumente en la región mediterránea entre 2ºC y 4ºC, mientras que las precipitaciones podrían disminuir entre un 4% y un 30% (IPCC, 2021). Estos cambios aumentarán el riesgo de desertificación y alterarán la composición de especies en los ecosistemas forestales, así como la provisión de servicios derivada. En este contexto, una de las principales herramientas para mitigar el cambio climático y la presión que ejerce sobre los bosques es la gestión forestal sostenible (ST-LAURENT et al. 2021). Por ejemplo, en Cataluña se ha documentado un aumento de hasta el 45% en el secuestro de carbono gracias a la gestión forestal (VAYREDA et al., 2012). Además, la gestión puede minimizar el riesgo de emisiones masivas de carbono a través de la reducción del riesgo de ocurrencia e impacto de perturbaciones naturales (AMEZTEGUI et al. 2024). Por último, los productos derivados de la madera contribuyen al almacenamiento de carbono a largo plazo y sustituyen materiales basados en combustibles fósiles (SAUD et al., 2013).

Aunque existen estudios previos que evalúan el impacto de la gestión forestal en la mitigación del cambio climático, la mayoría se localiza en ámbitos boreales o templados (PUKKALA, 2017; SCHULTE et al., 2022), o se centra en aspectos aislados del ciclo de carbono, como la capacidad de almacenamiento como biomasa o las emisiones derivadas de operaciones específicas o de la producción de un producto específico (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2009; SAUD et al., 2013). El estudio que aquí presentamos se diferencia al ofrecer un análisis integral del balance de carbono en bosques mediterráneos, considerando todo el ciclo de vida del bosque y sus productos derivados, desde el secuestro de carbono debido al crecimiento forestal hasta las emisiones asociadas a la descomposición, transporte y fabricación y uso de productos madereros, y todo ello bajo distintos escenarios climáticos y de gestión.
Para ello, utilizamos un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) para evaluar, mediante simulaciones de dinámica forestal, el impacto de distintos escenarios de gestión forestal y cambio climático en el balance de carbono en bosques mediterráneos. La metodología incluye las emisiones y capturas de carbono de diversos procesos relacionados con la gestión del bosque a lo largo de 100 años, desde las emisiones derivadas de los trabajos forestales o de la descomposición de la madera muerta, hasta el secuestro derivado del crecimiento del bosque o de la fabricación y procesado de los diversos productos derivados de la madera. Este enfoque integrador permite identificar tanto las oportunidades como los desafíos asociados con las distintas estrategias de gestión forestal bajo escenarios climáticos futuros. En este estudio aplicamos esta aproximación al caso particular de los bosques de *Pinus nigra*, y *Pinus sylvestris* en Cataluña, explorando las implicaciones de diversas alternativas de gestión adaptadas a las condiciones locales y objetivos climáticos. Con este estudio pretendemos contribuir a una mejor comprensión de las dinámicas de carbono bajo diferentes escenarios, proporcionando herramientas que sirvan para la toma de decisiones en la adopción de estrategias de mitigación y/o adaptación de los bosques.

2. Objetivos

El estudio plantea responder tres preguntas clave:

1. ¿Cuál es el rol de la gestión forestal y el cambio climático en el balance de carbono de los bosques mediterráneos?
2. ¿Es la gestión forestal una herramienta válida para reducir emisiones en

todos los escenarios?

3. ¿Una gestión más intensiva resultará en mayores tasas de emisión?

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la comarca del Solsonès, situada en la Cataluña central, a medio camino entre los Prepirineos y el valle del Ebro (NE de España). Esta región abarca aproximadamente 1.000 km² y está dividida en 14 municipios, con la mayoría de la población concentrada en Solsona (que sobrepasa los 9.000 habitantes), mientras que el resto del territorio está prácticamente despoblado (IDESCAT, 2022). La comarca presenta un marcado gradiente altitudinal que oscila entre los 400 m y los 2.400 m s.n.m., con un clima que varía desde mediterráneo seco en las zonas bajas hasta mediterráneo subhúmedo, según la clasificación de Köppen. La temperatura media anual es de 12°C y las precipitaciones oscilan entre 600 mm en el sur y 1.000 mm en el norte. Los bosques constituyen un componente relevante del paisaje, cubriendo el 62% de la superficie total, especialmente en la zona norte, más abrupta y por tanto menos propicia la agricultura. Para este estudio en concreto nos centramos en los bosques dominados por *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*, así como bosques mixtos de ambas especies, abarcando dos tercios de la superficie forestal de la región.

3.2 Aproximación metodológica

El estudio se centra en evaluar el balance de carbono bajo diferentes escenarios de gestión y climáticos, que determinarán tanto la dinámica del bosque (crecimiento, mortalidad), como la silvicultura aplicada y el tipo y cantidad de productos madereros obtenidos. La evolución futura del bosque bajo las distintas condiciones se basa en un estudio previo (MORÁN-ORDÓÑEZ et al. 2020) donde se utilizó el simulador de dinámica forestal SORTIE-ND (CANHAM et al. 2005) para analizar las sinergias en la provisión de diferentes servicios ecosistémicos. El trabajo que aquí se presenta utiliza dichas simulaciones para avanzar en la comprensión de los factores que determinan el balance de carbono asociado a la gestión forestal, utilizando un enfoque de “cradle-to-grave” (de la cuna a la tumba). Dicho enfoque considera las emisiones y sumideros de carbono de la multitud de procesos asociados a la gestión forestal: desde el establecimiento de las plántulas y su crecimiento, hasta el transporte y manufactura de los productos maderables generados y su ciclo de vida, pasando por las emisiones asociadas a los tratamientos selvícolas aplicados (cortas de mejora y regeneración) y las emisiones derivadas de la composición de la madera muerta y los restos de corta. La metodología de cálculo de balance de C para cada uno de estos procesos se basa en buena parte en la “Metodología de cálculo del impacto de la gestión forestal en el balance de Carbono” (CERVERA et al. 2022), desarrollado en el marco del proyecto LIFE-Climark, y que ha acabado derivando en la creación de los créditos climáticos como herramienta de fomento de la gestión forestal sostenible.

3.3 Definición de escenarios y simulación de dinámica forestal

Se definieron dos escenarios climáticos basados en las trayectorias representativas de concentración (RCP) generados por el IPCC: RCP 4.5 (escenario moderado) y RCP 8.5 (escenario extremo). Además, se diseñaron cuatro escenarios de gestión forestal para cada uno de los escenarios climáticos: (1) promoción de la bioenergía, con turnos cortos y enfocado en la producción de biomasa con fines energéticos; (2) almacenamiento de carbono, con turnos largos y producción de madera de

mayores dimensiones; (3) gestión ecohidrológica, con claras fuertes y tempranas para reducir la vulnerabilidad a la sequía; y (4) gestión habitual (business-as-usual), con cortas de selección diamétrica negativa (huroneo) consistentes en la extracción regular de los pies de mayores dimensiones.
Los datos iniciales de composición y estructura forestal se obtuvieron de la información del Tercer Inventario Forestal Nacional para la zona de estudio, que incluye 261 parcelas. A continuación se utilizó un modelo basado en individuos (SORTIE-ND) para simular la dinámica forestal de cada una de las parcelas bajo los distintos escenarios y durante 100 años. SORTIE-ND es un modelo espacialmente explícito, que tiene en cuenta la identidad y posición de cada árbol en una parcela, y simula su crecimiento, mortalidad y reproducción teniendo en cuenta tanto el clima como las interacciones competitivas con otros individuos. La composición y estructura de la parcela resulta por tanto de la conjunción de los procesos simulados para cada uno de los árboles, haciéndolo un modelo muy adecuado para simular parcelas mixtas y de estructura compleja. En total se realizaron 20880 simulaciones (261 parcelas x 2 escenarios climáticos x 4 escenarios de gestión x 10 repeticiones).

3.4 Balance de carbono

El balance de carbono se calculó para cada simulación como la diferencia entre capturas y emisiones de carbono a lo largo de los 100 años simulados. Durante ese periodo, las emisiones incluidas se derivan de: (i) trabajos forestales, (ii) transporte de productos, (iii) manufactura y procesado de productos de madera en fábrica y (iv) descomposición de madera muerta y restos de corta. Por otro lado las capturas provienen de: (i) crecimiento forestal, (ii) almacenamiento de C en productos de madera durante su vida útil, y (iii) carbono incorporado al suelo tras la descomposición de biomasa (Figura 1).

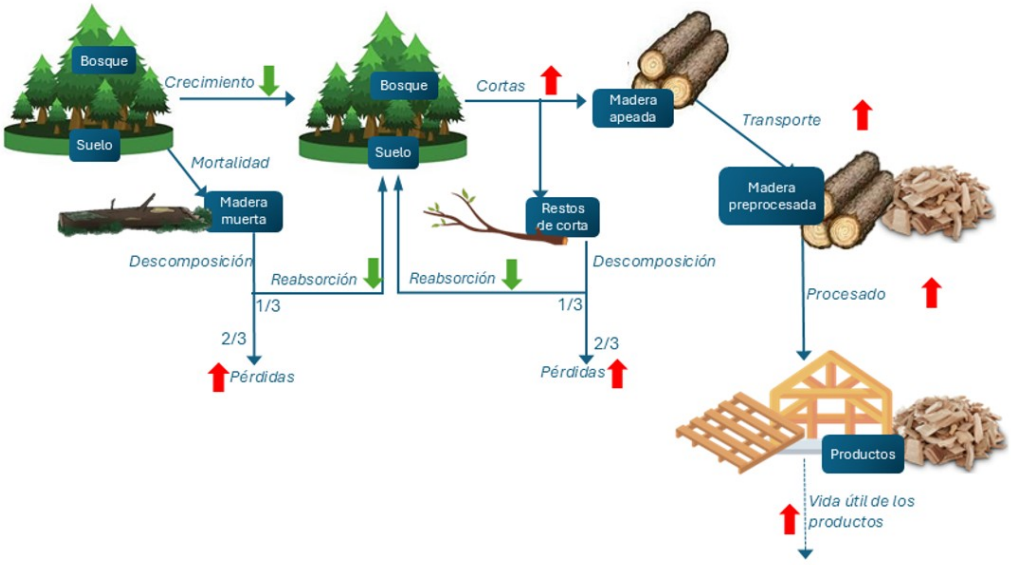

Figura 1. Principales procesos incluidos en el cálculo de balance de carbono, incluyendo aquellos que se consideran emisores de carbono (flechas rojas) y los que secuestran carbono de la atmósfera (flechas verdes).

Crecimiento y mortalidad

Los incrementos anuales en biomasa y carbono se calcularon a partir de las estimaciones de composición y estructura producidas anualmente por SORTIE-ND,

y aplicando las ecuaciones alométricas específicas para cada especie incluidas en el Manual de redacción de Planes técnicos de gestión y mejora forestal elaborado por el Centre de la Propietat Forestal (CPF). Estos valores fueron convertidos a tCO_2 eq./ha multiplicándolos por 3.66, que es el ratio entre la masa molar del CO_2 y la molécula de C. Las entradas de carbono al sistema incluyen el crecimiento neto de los árboles, mientras que las salidas consideran la biomasa de los árboles muertos y apeados. SORTIE-ND también incluye la dinámica de madera muerta en pie y su descomposición, lo que permite modelar los flujos de carbono asociados a la mortalidad natural y la descomposición de residuos leñosos (ver secciones siguientes).

Trabajos forestales

El plan específico de cortas para cada parcela se determinó a partir de su edad, estructura inicial y el escenario de gestión aplicado. Los planes de gestión podían incluir clareos, claras por lo bajo, y cortas de regeneración, que en todos los casos se aplicaron por aclareo sucesivo en 2 o 3 tiempos (ver AMEZTEGUI et al. 2024 para más detalles sobre la gestión aplicada). Las emisiones derivadas de las actividades de gestión incluyen las generadas por el uso de maquinaria (motosierras y tractores forestales) y el consumo asociado de combustible fósil. Estas se calcularon multiplicando el tiempo efectivo de trabajo en horas por hectárea de cada maquinaria por el consumo de combustible y el factor de emisión correspondiente (Ecuación 1).

$$Emisiones\,(kgCO\,2/ha) = TTE * CC * FE \quad (1)$$

Donde TTE es el tiempo de trabajo efectivo, en horas por hectárea; CC es el consumo de combustible (en litros por hora); y FE el factor de emisión, en kg por litro. Los valores para cada tipo de intervención se obtuvieron de CERVERA et al. (2022) (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de tiempo efectivo de trabajo, consumo de combustible y factores de emisión para los principales trabajos selvícolas simulados. Fuente: CERVERA et al. (2022)

	Clareos		Claras por lo bajo		Aclareo sucesivo	
	Motosierra	*Skidder*	*Motosierra*	*Skidder*	*Motosierra*	*Skidder*
Tiempo de trabajo efectivo (h/ha)	48	-	40	24	32	16
Consumo de combustible (l/h)	0.625	-	0.625	6.5	0.625	6.5
Factor emisión (kg CO2/l)	2.24	-	2.24	2.68	2.24	2.68
Emisiones totales (kg CO2/ha)	67.2	-	56.0	418.1	44.8	278.7
Emisiones totales (tCO2/ha)	0.0672		0.474		0.323	

Descomposición de madera y restos de corta

La descomposición de restos de corta como ramas y hojas, que no se extraen tras la corta, así como de la parte radicular, contribuyó también a las emisiones a la atmósfera. Para calcularla se utilizaron ecuaciones alométricas (MONTERO et al. 2005) para calcular la biomasa de hojas y ramas finas (< 2cm), medias (2-7 cm) y gruesas (> 7 cm), así como de la parte radicular, a partir del diámetro de cada uno de los árboles que se cortaban en cada parcela cada año. Posteriormente se utilizó una ecuación exponencial negativa de acuerdo con MATTSON et al. (1987) (Ecuación 2):

$$B_t = B_0 * exp^{(-k*t)} \quad (2)$$

Donde Bt es la biomasa remanente en el año t, Bo es la biomasa inicial, k es la tasa de descomposición y t es el tiempo en años. Se utilizó un valor de k diferente para cada fracción y especie (Tabla 2):

Tabla 2. Tasa de descomposición (k) aplicada en la ecuación 2 según especie y fracción de biomasa. Fuente: GARCÍA-PAUSAS et al. (2022)

	Tasa de descomposición (k)	
	P. nigra	P. sylvestris
Hojas	0.3700	0.4246
Ramas finas (< 2 cm)	0.0820	0.0300
Ramas medias (2-7 cm)	0.0410	0.0300
Ramas gruesas (> 7 cm)	0.0680	0.0500
Sistema radicular	0.2900	0.2900

Se determinó que el 47% de la biomasa corresponde a carbono. Además, siguiendo a MATTSON et al. (1987), consideramos que dos tercios del carbono liberado se emitieron a la atmósfera, mientras que 1/3 es reabsorbido por el suelo, contribuyendo al stock de carbono del sistema.

Transporte de madera

La madera apeada se asignó a diferentes fines según las dimensiones del pie y la especie: madera para trituración (apta para producción de papel y/o combustión como bioenergía), madera para postes, madera de sierra media (apta para pallets y/o muebles) y madera de sierra grande, con fines estructurales. Las emisiones por transporte se calcularon considerando el número de viajes en camión, calculado a partir del volumen de madera apeada de cada tipo en cada parcela e intervención y la capacidad del camión (16 toneladas). Se consideró una distancia promedio a los centros de procesamiento de 80 km para madera aserrada y 40 km para astillas, y se utilizó un factor de emisión estándar para camiones rígidos en carreteras rurales de 0.549 kg $CO_2 \cdot km^{-1}$ (CERVERA et al. 2022), asumiendo que las emisiones son iguales en trayectos cargados y vacíos.

Procesado de la madera

La madera apeada se derivó a una serie de productos en función de la especie y su dimensión: (i) astillas para bioenergía; (ii) pulpa para papel y cartón; (iii) pallets; (iv) postes; (v) tablero para muebles; y (vi) madera de construcción. Asumimos que un 50% de la madera de trituración se destinaría a papel y el otro 50% a

producción de energía. Igualmente, un 50% de la madera de sierra se asumió que iría destinada a tablero para muebles, y la otra mitad a pallets.
Cada uno de estos productos tenía asociada unas emisiones derivadas de su proceso de transformación en fábrica. Así, para la producción de papel consideramos una emisión media de 757 kg $CO_2 \cdot t^{-1}$, lo que incluye consumo de combustible y electricidad (TOMBERLIN et al. 2020), y asumiendo que se necesitan 4.49 m^3 de madera para producir una tonelada de papel. En el caso de la madera para producción de energía no se consideraron emisiones por procesado, ya que toda la madera destinada a ello se quemaba y emitía en el mismo año que su producción (ver sección siguiente).
Según BOLIN y SMITH (2011) el procesado de un poste de unos 13 metros libera 42.75 kg de CO2. En nuestro caso calculamos el número de postes producidos asumiendo que cada poste tiene un volumen aproximado de 0.6432 m3. Las emisiones de la serrería se adaptaron a partir de PUETTMANN et al. (2014), que asume unas emisiones de 6.60 kg $CO_2 \cdot m^{-3}$ para madera aserrada y secada al aire.

Vida útil y amortización de los productos
El carbono almacenado en productos de madera se calculó considerando la eficiencia de procesado y el tiempo de vida útil de cada producto (CERVERA et al. (2022). Los productos de larga vida, como madera estructural y muebles, tienen un mayor impacto positivo en el balance de carbono debido a su capacidad para retener carbono durante décadas, mientras que productos de ciclo corto, como papel, liberan rápidamente el carbono almacenado. Como la vida útil de algunos productos va más allá del periodo simulado, se calculó para cada producto una "tasa de amortización de carbono", dividiendo su vida útil por el periodo simulado (100 años). Por ejemplo, el papel tiene una vida útil de 2 años, y una tasa de amortización de 0,02.

Tabla 3. Eficiencia de procesado y vida útil de los diferentes productos forestales considerados. Fuente: CERVERAet al. (2022)

Producto	Eficiencia de procesado	Vida útil (años)
Madera estructural	60%	90
Muebles	60%	50
Pallets	60%	10
Postes	80%	30
Biomasa para energía	100%	0
Pasta para papel	50%	2

4. Resultados

4.1 Producción de madera y de productos derivados

La producción total de madera mostró una variación significativa entre escenarios de gestión y condiciones climáticas, y también como reflejo de las diferentes condiciones iniciales simuladas. En general, los bosques dominados por *Pinus sylvestris* mostraron un rendimiento notablemente superior, con una producción promedio de 204 m^3/ha para los 100 años simulados, en comparación con los bosques de *Pinus nigra*, que produjeron 117 m^3/ha para el mismo periodo.
La mayor producción de madera se obtuvo en el escenario de promoción de

bioenergía y para *Pinus sylvestris,* alcanzando un promedio de 295 m³/ha bajo condiciones climáticas moderadas (RCP 4.5) y 235 m³/ha bajo condiciones severas (RCP 8.5). De media, la producción bajo este escenario de gestión alcanzó los 210 m³/ha, formados predominantemente por productos de ciclo corto, como madera de trituración, que representó entre el 60% y el 75% de la producción total en volumen (Figura 2). En contraste, el escenario de almacenamiento de carbono priorizó la generación de productos de larga vida útil, como madera estructural y para mobiliario, que representaron entre el 45% y el 60% del volumen extraído. Sin embargo, este escenario resultó en una producción de madera de casi la mitad que el escenario anterior (105 m³/ha). La gestión ecohidrológica y el escenario de gestión actual presentaron valores de producción intermedios (175 y 150 m³/ha respectivamente) y con una producción más diversificada que incluyó madera de sierra media y también de menores dimensiones. Llama la atención que sólo se pudo obtener madera de sierra grande, adecuada para uso estructural, en algunas de las parcelas de *P. sylvestris* y bajo escenarios de gestión ecohidrológica o de almacenamiento de carbono (Figura 2).

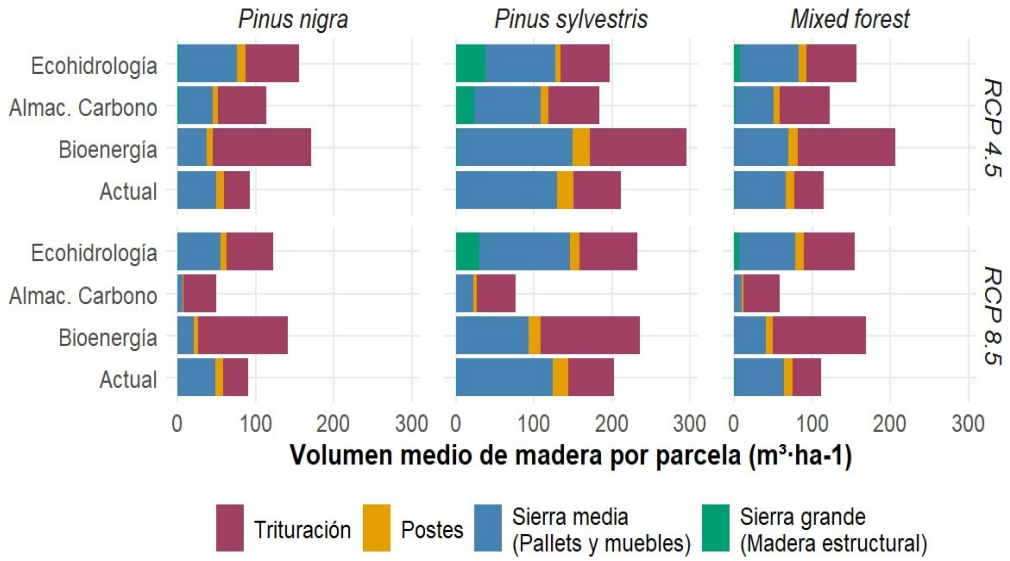

Figura 2. Producción media por parcela (en m³/ha) de los principales destinos de madera según la especie principal y el escenario climático y de gestión considerado

4.2 Emisiones totales y distribución por procesos

Las emisiones derivadas de las actividades forestales estuvieron dominadas por el procesado de productos de madera en fábrica, que representaron entre el 50% y el 75% del total de emisiones. La descomposición de madera muerta fue la siguiente fuente de emisiones en importancia, representando aproximadamente una cuarta parte del total. Por último, los trabajos forestales, que incluyen las cortas de mejora y regeneración, contribuyeron con un 10-15%, mientras que el transporte representó tan sólo entre el 5% y el 10% del total de emisiones (Figura 3).

El escenario de promoción de bioenergía registró las mayores emisiones, principalmente debido a la alta frecuencia de las cortas y el alto volumen de madera generado, que conllevó mayores emisiones tanto de transporte, como sobre todo de manufactura y procesado de los productos. En este escenario, las emisiones netas promediaron 50 tCO_2/ha, con escasas diferencias entre escenarios climáticos y especies, si bien las emisiones siempre fueron algo mayores para *P. sylvestris*. En comparación, los otros tres escenarios - menos intensivos - presentaron menores emisiones, alrededor de los 30 tCO_2/ha para todas ellas,

debido a la menor frecuencia de trabajos forestales.

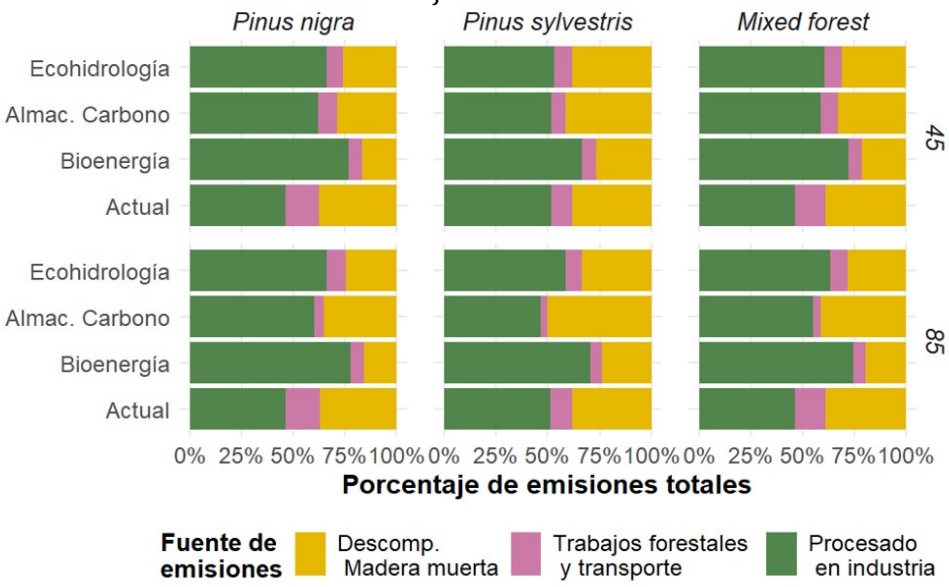

Figura 3. Porcentaje de emisiones de CO2 por fuentes de emisión, la especie principal y el escenario climático y de gestión considerado

4.3 Fijación de carbono

El secuestro de carbono estuvo claramente dominado por el carbono fijado por el crecimiento neto de las masas, que representó el 77% del total en promedio. Por otro lado, el secuestro de carbono a través de su almacenamiento en productos de madera contribuyó con un 18% del total secuestrado, destacando especialmente en escenarios orientados a productos de larga vida útil, donde la madera estructural mostró una capacidad de almacenamiento de hasta 45 tCO2 eq./ha.

Los bosques dominados por *Pinus sylvestris* mostraron una mayor capacidad de captura en comparación con los de *Pinus nigra,* especialmente bajo condiciones climáticas extremas. Bajo RCP 8.5, *Pinus sylvestris* mantuvo una tasa de captura promedio de 172 tCO2 eq./ha, mientras que *Pinus nigra* registró solo 80 tCO2 eq./ha debido a su menor tasa de crecimiento. El escenario climático RCP 8.5 tuvo un impacto notable en todos los tipos de gestión, reduciendo las tasas de captura en un promedio del 15% en comparación con RCP 4.5. Este efecto fue más pronunciado en los escenarios de manejo intensivo, como la promoción de bioenergía, donde la combinación de alta extracción y estrés hídrico resultó en una eficiencia significativamente menor en el secuestro de carbono.

Las mayores tasas de secuestro se observaron en el escenario de almacenamiento de carbono, sobre todo en el escenario climático más severo, donde los turnos se alargaron hasta más allá de los 200 años. La capacidad de secuestro fue siempre muy superior para los bosques de *P. sylvestris*, donde se llegaron a fijar 380 tCO2 eq./ha de media. En contraste, las menores tasas de secuestro de carbono se obtuvieron en el escenario de promoción de biomasa, con valores inferiores a los 100 tCO2 eq./ha para *P.sylvestris*, y tan bajos como 20 tCO2 eq./ha para *P. nigra* (Figura 4).

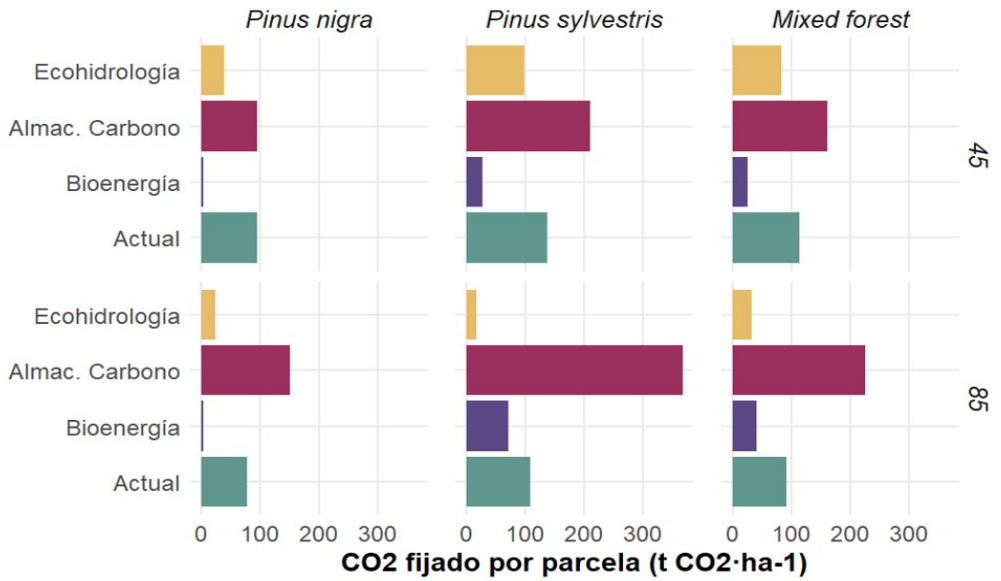

Figura 4. Cantidad total de CO2 fijado debido al crecimiento de la masa según la especie principal y el escenario climático y de gestión considerado

En cuanto al carbono retenido en los productos generados, destaca la alta aportación de la madera para muebles, que en muchos casos representó más de tres cuartas partes del total. La importancia del resto de productos fue mucho menor debido a su escasa producción (postes), corta vida útil (bioenergía o papel) o una combinación de ambas (pallets). Destaca también que la madera estructural solo tuvo un papel relevante para pino albar y cuando se aplicó selvicultura de tipo adaptativo, bien de base ecohidrológica o de almacenamiento de carbono (Figura 5). Sin embargo, en el resto de los escenarios, los árboles no llegaron a las dimensiones necesarias para producir este tipo de madera, lo que muestra la utilidad de esta selvicultura en las condiciones más severas.

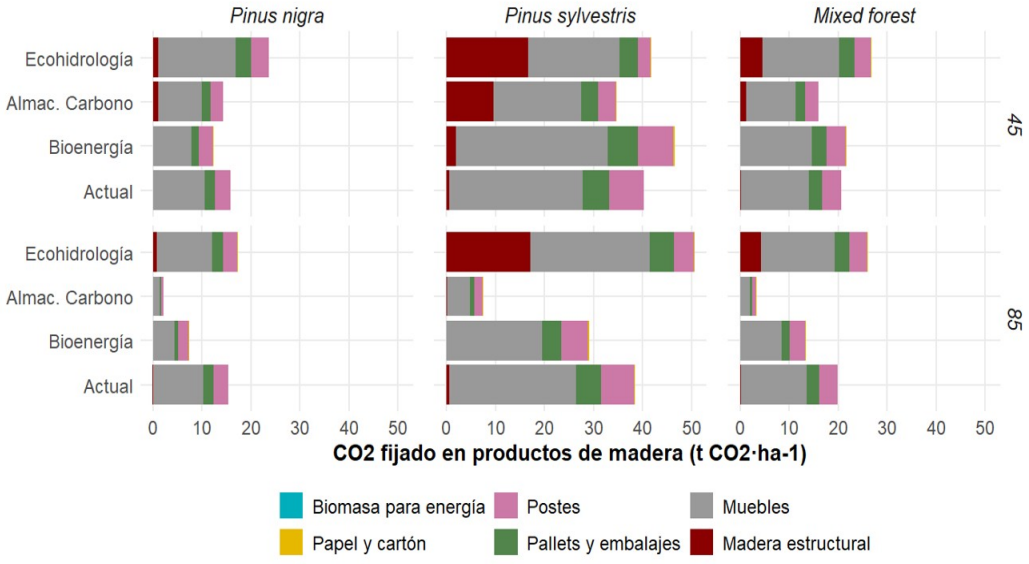

Figura 5. Cantidad total de CO2 fijado por los productos derivados de la madera según el tipo de producto, la especie principal y el escenario climático y de gestión

4.4 Balance neto de carbono

El balance neto de carbono fue positivo en la mayoría de los escenarios, aunque casi siempre menor en el escenario RCP 8.5, donde las condiciones climáticas extremas exacerbaron las limitaciones hídricas y redujeron significativamente el crecimiento del bosque. El balance más positivo llegó hasta las 200 tCO_2 eq./ha en el escenario de almacenamiento de carbono bajo RCP 4.5 (Tabla 4). Este resultado refleja el efecto combinado de altas tasas de secuestro en los bosques y el almacenamiento a largo plazo en productos derivados. En el extremo opuesto, el escenario de promoción de bioenergía presentó balances negativos en algunos casos, particularmente para *P.nigra*, donde las emisiones superaron las capturas, generando un balance neto de hasta -25 tCO_2 eq./ha (Tabla 4).

Tabla 4. Balance neto de carbono para los diferentes escenarios climáticos y de gestión simulados en bosques de Pinus nigra y Pinus sylvestris

Escenario climático y de gestión	P. nigra	P. sylvestris
Gestión ecohidrológica		
RCP 4.5	37.1	111.9
RCP 8.5	18.7	36.5
Business as usual		
RCP 4.5	94.7	147.1
RCP 8.5	76.6	118.1
Promoción de biomasa		
RCP 4.5	-24.7	26.6
RCP 8.5	-25.4	53.8
Almacenamiento de carbono		
RCP 4.5	86.0	215.7
RCP 8.5	138.6	352.1

5. Discusión

El presente estudio evalúa el impacto del cambio climático y la gestión forestal en el balance de carbono, ofreciendo una visión integral de los principales factores que intervienen en la capacidad de mitigación de los bosques mediterráneos, un área emergente de investigación. Los resultados muestran que alternativas de gestión más intensivas conducen a balances netos de carbono cercanos a cero, incluso con valores negativos – es decir, que actúan como fuente neta de carbono – para especies menos productivas como *Pinus nigra*. En contraste, las estrategias de gestión orientadas al almacenamiento de carbono y a fomentar la capacidad de adaptación de los bosques presentaron un mejor resultado, gracias a la menor mortalidad y sobre todo a la generación de productos de madera con mayor ciclo de vida.

Nuestros resultados muestran que, a pesar de que la mayoría de las opciones de gestión simuladas suponen una absorción neta de carbono desde la atmósfera hacia la biomasa viva, el suelo, o los productos derivados de la madera, el balance final de carbono depende significativamente del tipo de productos generados y sus ciclos de vida. La producción de madera de dimensiones y calidad suficientes para su uso estructural y/o en muebles resulta crucial para mantener balances positivos de carbono, debido a su capacidad de almacenamiento a largo plazo. En contraste, los productos de ciclo de vida corto, como biomasa y papel, liberan carbono rápidamente, lo que afecta negativamente el balance.

5.1 Emisiones de carbono

El procesado de la madera en las respectivas industrias fue la principal fuente de emisiones, particularmente en la producción de biomasa y papel, cuyos ciclos de vida cortos liberan carbono rápidamente. Aunque algunos autores argumentan que el uso de biomasa puede reducir significativamente las emisiones al sustituir combustibles fósiles (SULAIMAN et al., 2020; XU et al., 2021), otros señalan que su uso intensivo podría aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) a medio plazo, además de afectar a la biodiversidad y otros servicios ecosistémicos (BIRDSEY et al., 2018). En este estudio, el escenario de gestión para la producción de bioenergía mostró las mayores tasas de emisión, debido a la extracción intensiva de madera y la preponderancia de productos de vida corta, llegando a tener balances netos negativos. En contraste, los productos de madera sólida presentaron menores emisiones en su procesado y ofrecen almacenamiento de carbono a largo plazo, si bien el uso de procesos industriales no considerados aquí, como el secado forzado, podría aumentar estas emisiones (BOLIN y SMITH, 2011). En cuanto a las operaciones de corta y transporte de la madera, estas representaron el 10% y el 5% de las emisiones totales, respectivamente. Esta baja proporción resultó sorprendente, ya que se esperaba que tuvieran un mayor peso en el balance final, sobre todo el transporte. Factores como la pendiente del terreno, la distancia al mercado y la mecanización influyen significativamente en los rendimientos de los trabajos, y por lo tanto también en las emisiones. Estudios como el de COSOLA et al. (2016) destacan que la mecanización puede reducir las emisiones por kWh, aunque esto no siempre es viable en terrenos montañosos como los de Cataluña. Además, cabe destacar que nuestra aproximación a las emisiones por transporte podría considerarse un tanto simplista, ya que se consideró un camión de la misma capacidad para todos los productos, con un factor de emisión independiente de la carga y con una distancia promedio a los centros de procesado. En este sentido, las distancias de transporte para productos de mayor valor añadido pueden extenderse hasta 200 km en función del desarrollo industrial de las zonas de estudio (DEVLIN et al., 2013) y de la densidad de vías de saca, que es en general muy escasa (VADELL et al. 2022). Futuros trabajos deberían profundizar más en las emisiones asociadas a la extracción de madera a pista y el posterior transporte a fábrica, idealmente trabajando con ubicaciones reales de instalaciones industriales, lo que permitiría un análisis espacialmente explícito de las emisiones asociadas.

5.2 Capturas de carbono

La captura de carbono a lo largo del ciclo de gestión se concentró principalmente en el crecimiento de la masa, que representó el 77% del total. El almacenamiento en productos de madera contribuyó con el 18%, mientras que la descomposición de materia orgánica representó menos del 4%. En este sentido, cabe destacar que aunque los escenarios supusieron tasas de extracción altas (cercanas al 60-70% de la posibilidad), aun así el bosque siguió capitalizándose y acumulando biomasa, y por lo tanto carbono. En ese sentido, las tasas de extracción habituales en entornos mediterráneos son habitualmente muy inferiores, lo que pone de manifiesto que se podría aumentar la intensidad de los aprovechamientos sin que tuviera repercusiones en el balance de carbono (VADELL et al. 2022).

No obstante, nuestras simulaciones no tuvieron en cuenta el efecto de liberación de carbono asociado a las perturbaciones forestales, lo que podría habernos llevado a una sobreestimación de la capacidad de secuestro de carbono. Aunque el modelo utilizado sí incluye un módulo de mortalidad juvenil y adulta, esta depende fundamentalmente de la competición y el clima, y el modelo no permite la

inclusión de perturbaciones como incendios, plagas o tormentas. En este sentido, estudios recientes utilizando el mismo conjunto de datos nos han permitido evaluar que algunos de los escenarios considerados – fundamentalmente el business as usual – suponen situar las masas en un elevado riesgo frente a sequías e incendios forestales, debido a la acumulación de numerosos pies de escaso desarrollo (AMEZTEGUI et al. 2024). En caso de producirse una perturbación de este tipo se traduciría en la liberación de todo el carbono almacenado hasta el momento, lo que sin duda podría influir en los resultados obtenidos.

5.3 Limitaciones y futuras investigaciones

Este estudio proporciona una evaluación de los flujos de carbono bajo diferentes escenarios de gestión forestal y cambio climático, considerando además una amplia variedad de procesos implicados en dicho balance. Sin embargo, supone una primera aproximación, y somos conscientes de que no está exenta de limitaciones o posibilidades de mejora. Por ejemplo, algunos de los factores de emisión utilizados provienen de estudios en Estados Unidos o Canadá, debido a la falta de datos específicos para España, lo que puede introducir sesgos en los análisis realizados. Sin duda este es un campo que podrá mejorarse según se vaya desarrollando más investigación en este ámbito.

En términos operativos, sería útil realizar análisis espaciales más detallados que consideren factores locales, como la pendiente del terreno y la distancia a infraestructuras viarias o industriales, para capturar mejor las emisiones asociadas al procesado de la madera, así como la variabilidad espacial de las emisiones. Otra posibilidad interesante sería la realización de un análisis de sensibilidad de emisiones para diferentes escenarios (por ejemplo, diferentes distancias de transporte, o diferentes proporciones de productos generados). Este tipo de análisis, si bien puede resultar más complejo de interpretar, permitiría a los gestores evaluar las consecuencias de diferentes opciones bajo un mayor abanico de opciones, sin limitar los resultados a las condiciones testadas aquí.

Finalmente, no hay que olvidar que este estudio consiste en un ejercicio de simulación, y por lo tanto limitado por las características del modelo utilizado. Aunque SORTIE-ND ya ha mostrado realizar simulaciones realistas en ámbitos como el considerado aquí, un modelo más basado en procesos y que tenga en cuenta las particularidades del entorno mediterráneo sin duda mejoraría las predicciones (DE CÁCERES et al. 2023). Además, incluir en las simulaciones los efectos de perturbaciones como incendios, plagas o eventos climáticos extremos podría mejorar la representación de las condiciones mediterráneas y sus implicaciones en los balances de carbono.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman que las estrategias de gestión forestal tienen un impacto directo y significativo en el balance de carbono de los ecosistemas. En particular, los escenarios que priorizan el almacenamiento de carbono y la generación de productos de larga vida útil generan balances más positivos, contribuyendo a mitigar los efectos del cambio climático mediante la captura y el almacenamiento a largo plazo en productos derivados. Por otro lado, los escenarios de gestión más intensiva como la promoción de madera para bioenergía, si bien pueden generar beneficios económicos inmediatos, presentan desventajas significativas en términos de emisiones netas y sostenibilidad a largo plazo. La alta extracción de biomasa y la corta vida útil de los productos derivados limitan la capacidad de estos sistemas para actuar como sumideros efectivos, especialmente bajo condiciones climáticas extremas y en el caso de especies menos productivas.

7. **Agradecimientos**

Este proyecto se ha financiado a partir de los proyectos INFORMED y LIFE-CLIMARK, y se ha realizado en el marco del Grupo de Investigación ADAPTAFOR, financiado por AGAUR. Aitor Ameztegui es profesor Serra-Húnter de la Generalitat de Catalunya.

8. **Bibliografía**

AMEZTEGUI, A., COLL, L., DE CÁCERES, M., MORÁN-ORDÓÑEZ, A. 2024. Disturbance impacts on Mediterranean forests across climate and management scenarios. *J Environ Manage* 371.

BIRDSEY, R., DUFFY, P., SMYTH, C., KURZ, W.A., DUGAN, A.J., HOUGHTON, R., 2018. Climate, economic, and environmental impacts of producing wood for bioenergy. *Environ. Res. Lett.* 13, 050201.

BOLIN, C.A., SMITH, S.T., 2011. Life cycle assessment of pentachlorophenol-treated wooden utility poles with comparisons to steel and concrete utility poles. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 2475–2486.

CANHAM, C.D., MURPHY, L.E., PAPAIK, M.J., 2005. SORTIE-ND: Software for spatialy-explicit simulation of forest dynamics. Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, NY, USA.

CERVERA, T., BAIGES, T., RABASCALL, X., PORRAS, D., PALERO, N., AMEZTEGUI, A., VEGA, C., RODRIGUES, M., ALCASENA, F., VAYREDA, J., CASALS, P., BELTRAN, M., BALLART, H., GILI, I., LIZARRALDE, I., 2022. Methodology for calculating the impact of forest management on ecosystem services: carbon, water and biodiversity. Forest Ownership Centre, Santa Perpètua de Mogoda.

DE CÁCERES, M., MOLOWNY-HORAS, R., CABON, A., MARTÍNEZ-VILALTA, J., MENCUCCINI, M., GARCÍA-VALDÉS, R., NADAL-SALA, D., SABATÉ, S., MARTIN-STPAUL, N., MORIN, X., D'ADAMO, F., BATLLORI, E., AMEZTEGUI, A., 2023. MEDFATE 2.9.3: a trait-enabled model to simulate Mediterranean forest function and dynamics at regional scales. *Geosci. Model Dev.* 16, 3165–3201.

DEVLIN, G., KLVAC, R., MCDONNELL, K., 2013. Fuel efficiency and CO2 emissions of biomass based haulage in Ireland – A case study. *Energy* 54, 55–62.

FAO, 2018. State of Mediterranean forests 2018.

GARCÍA-PAUSAS, J., FUENTES, C., PALERO, N., BAIGES, T., AMEZTEGUI, A., CASALS, P. 2022. Assessment of the impact of forestry treatments on soil carbon balance. LIFE CLIMARK project report. Deliverable 38. 31pp. https://lifeclimark.eu/wp-content/uploads/2023/01/D38_lmpactOnSoilCarbon_C4.pdf

GONZÁLEZ-GARCÍA, S., BERG, S., MOREIRA, M.T., FEIJOO, G., 2009. Evaluation of forest operations in Spanish eucalypt plantations under a life cycle assessment perspective. *Scand. J. For. Res.* 24, 160–172.

GRISCOM, B.W., ADAMS, J., ELLIS, P.W., HOUGHTON, R.A., LOMAX, G., MITEVA, D.A., SCHLESINGER, W.H., SHOCH, D., SIIKAMÄKI, J.V., SMITH, P., WOODBURY, P., ZGANJAR, C., BLACKMAN, A., CAMPARI, J., CONANT, R.T., DELGADO, C., ELIAS, P., GOPALAKRISHNA, T., HAMSIK, M.R., HERRERO, M., KIESECKER, J., LANDIS, E., LAESTADIUS, L., LEAVITT, S.M., MINNEMEYER, S., POLASKY, S., POTAPOV, P., PUTZ, F.E., SANDERMAN, J., SILVIUS, M., WOLLENBERG, E., FARGIONE, J., 2017. Natural climate solutions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 11645–11650.

IDESCAT. (2022). Institut d'Estadística de Catalunya. Disponible online: www.idescat.cat

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

LECINA-DIAZ, J., SENF, C., GRÜNIG, M., SEIDL, R., 2024. Ecosystem services at risk from disturbance in Europe's forests. *Glob. Chang. Biol.* 30, e17242.

MATTSON, K.G., SWANK, W.T., WAIDE, J.B., 1987. Decomposition of woody debris in a regenerating, clear-cut forest in the Southern Appalachians. *Can. J. For. Res.* 17, 712–721.

MONTERO, G., RUIZ-PEINADO, R., MUÑOZ, M., 2005. Producción de biomasa y fijación de CO2 por los bosques españoles, Monografías INIA: Serie Forestal. Instituto Nacional de Investigación y Técnica Agraria y Alimentaria, Madrid.

MORAN-ORDOÑEZ, A., AMEZTEGUI, A., DE CACERES, M., DE-MIGUEL, S., LEFEVRE, F., BROTONS, L., COLL, L., 2020. Future trade-offs and synergies among ecosystem services in Mediterranean forests under global change scenarios. *Ecosyst Serv* 45, 101174.

PUKKALA, T. 2017. Does management improve the carbon balance of forestry? *Forestry* 2017; 90, 125–135

SAUD, P., WANG, J., LIN, W., SHARMA, B.D., HARTLEY, D.S., 2013. A Life Cycle Analysis of Forest Carbon Balance and Carbon Emissions of Timber Harvesting in West Virginia. *Wood and Fiber Science* 45, 250–267.

SCHULTE, M., JONSSON, R., HAMMAR, T., STENDAHL, J., HANSSON, PA. 2022 Nordic forest management towards climate change mitigation: time dynamic temperature change impacts of wood product systems including substitution effects *Eur J Forest Res* 141, 845–863

ST-LAURENT, G.P., LOCATELLI, B., HOBERG, G., GUKOVA, V., HAGERMAN, S., 2021. Models for integrating climate objectives in forest policy: Towards adaptation-first? *Land Polic.* 104, 105357.

SULAIMAN, C., ABDUL-RAHIM, A.S., OFOZOR, C.A., 2020. Does wood biomass energy use reduce CO2 emissions in European Union member countries? Evidence from 27 members. *J. Clean. Prod.* 253, 119996.

TOMBERLIN, K.E., VENDITTI, R., YAO, Y., 2020. Life cycle carbon footprint analysis of pulp and paper grades in the United States using production-line-based data and integration. B*ioResources* 15, 3899–3914.

VADELL, E., PEMÁN, J., VERKERK, P.J., ERDOZAIN, M., DE-MIGUEL, S., 2022. Forest management practices in Spain: Understanding past trends to better face future challenges. *For. Ecol. Manag*. 524, 120526.

VAYREDA, J., MARTINEZ-VILALTA, J., GRACIA, M., RETANA, J., 2012. Recent climate changes interact with stand structure and management to determine changes in tree carbon stocks in Spanish forests. *Global Change Biol* 18, 1028–1041.

VERKERK, P.J., DELACOTE, P., HURMEKOSKI, E., KUNTTU, J., MATTHEWS, R., MÄKIPÄÄ, R., MOSLEY, F., PERUGINI, L., REYER, C.P.O., ROE, S., TRØMBORG, E., 2022. Forest-based climate change mitigation and adaptation in Europe, From Science to Policy 14. European Forest Institute.

XU, H., LATTA, G., LEE, U., LEWANDROWSKI, J., WANG, M., 2021. Regionalized Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Forest Biomass Use for Electricity Generation in the United States. *Environ. Sci. Technol.* 55, 14806–14816.