



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1455

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

Organiza





RESONATE: síntesis de cuatro años de investigación en resiliencia y gestión adaptativa de los bosques Europeos frente a perturbaciones climáticas

UZQUIANO PÉREZ, S. (1), LLORET, F (2,3), ESPELTA, J.M. (3), LINDNER, M (1)

(1) European Forest Institute – Resilience Programme Bonn, Alemania.

(2) Unidad de Ecología, Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología, Universitat Autònoma Barcelona (UAB), Edifici C, 08193. Cerdanyola del Vallès, Barcelona, España.

(3) CREAM, Edifici C, Universitat Autònoma Barcelona (UAB), 08193 Cerdanyola del Vallès, Barcelona, España

Resumen

RESONATE, un proyecto Horizonte 2020 financiado por la Comisión Europea, ha centrado su investigación en recopilar evidencias científicas para la gestión de los bosques europeos. Para ello, se compararon diferentes escenarios de gestión forestal, evaluando su capacidad para mantener la futura producción de madera en Europa y mitigar los impactos de las perturbaciones en tres posibles escenarios climáticos (histórico, RCP4.5, RCP8.5). Se evaluó hasta qué punto el aumento de la resiliencia de estos bosques depende de los contextos socioecológicos, clima y servicios ecosistémicos considerados. Los resultados muestran que no existe un único enfoque de gestión, sino que la eficacia varía en función de la variable del sistema socioecológico considerada y del escenario climático. Finalmente, se identificaron posibles conflictos entre la estabilidad y la provisión media de diferentes servicios ecosistémicos a lo largo del tiempo, manifestando que las estrategias que promueven la estabilidad podrían comprometer la provisión de ciertos servicios a largo plazo o llevar a nuestros bosques a tendencias negativas a finales del siglo XXI. En conclusión, RESONATE ofrece información útil para los gestores forestales y los responsables políticos, con el fin de garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas forestales y sus servicios asociados.

Palabras clave

Estabilidad; gestión forestal; asesoramiento, servicios ecosistémicos.

1. **Introducción** Los bosques europeos son sistemas socioecológicos complejos que se enfrentan a un incremento de perturbaciones tanto naturales (ej., viento, plagas incendios) como de origen antrópico (ej., asociadas a la gestión forestal y al uso del territorio). Comprender cómo estas perturbaciones impactan en estos sistemas resulta un desafío debido a la escasez de datos explícitos espacialmente y a largo plazo (SENF et al., 2022). Estos ecosistemas desempeñan un papel crucial en la preservación



de la biodiversidad y en la provisión de servicios ecosistémicos esenciales. Sin embargo, su capacidad de adaptación está siendo puesta a prueba por los retos impuestos por el cambio climático (SCHMID et al., 2024) que cada vez son más acusados. En este contexto, los regímenes de perturbación emergen como contextos clave para evaluar la resiliencia forestal (NIKINMAA et al., 2020), ya que determinan la capacidad de los sistemas para responder a perturbaciones pasadas y anticipar el impacto de las futuras (SENF et al., 2022). Los estudios realizados hasta la fecha suelen centrarse en la naturalidad de los bosques, omitiendo a menudo el papel de la gestión humana (NAGEL et al., 2017; SENF Y SEIDL, 2018), por ejemplo al no distinguir entre perturbaciones naturales y las inducidas por el ser humano (SENF Y SEIDL, 2021). Esta falta de diferenciación limita el conocimiento sobre los efectos específicos de cada tipo de perturbación y las alternativas óptimas de gestión forestal para garantizar la resiliencia frente a futuros desafíos. En este contexto de una necesaria comprensión integrada de cómo fortalecer la resiliencia de los sistemas forestales europeos y su cadena de valor asociada, surge el proyecto RESONATE (<https://resonateforest.org/>) como una iniciativa innovadora diseñada para proponer a través de un enfoque interdisciplinario estrategias adaptativas que consideren las interacciones entre la gestión forestal, los regímenes de perturbación y los servicios ecosistémicos combinando herramientas avanzadas de modelización, análisis de políticas, y estudios de casos regionales. De esta forma, RESONATE ha sido el primer proyecto europeo en investigar la resiliencia desde un punto de vista socio-ecológico con un enfoque específico en la cadena de valores forestal, buscando así, proporcionar soluciones basadas en la evidencia que no solo respondan a los retos actuales del cambio climático, sino que también anticipen y mitiguen los impactos de futuras perturbaciones, asegurando la sostenibilidad y funcionalidad de los ecosistemas forestales europeos. El presente artículo ofrece una síntesis del trabajo de investigación realizado en el proyecto RESONATE durante sus cuatro años de desarrollo desde marzo de 2021 hasta marzo de 2025. En este informe se presenta: (i) la metodología de evaluación de la resiliencia desarrollada, (ii) un resumen del análisis de los focos de perturbación forestal en Europa y sus proyecciones futuras, (iii) el potencial de diferentes medidas de gestión forestal para mejorar la resiliencia de los bosques y las cadenas de valor asociadas, y (iv) las diferencias regionales en la eficacia de estas medidas, basándose en estudios de casos de modelización forestal. Además, el artículo compara cómo perciben las partes interesadas los retos y las medidas de resiliencia en tres países de estudio (Bavaria-Alemania, Galicia-España y FinlandiaXXXXX), y cómo se pueden gestionar las posibles compensaciones. **2. Objetivos**

El objetivo de este artículo es sintetizar los resultados de las revisiones bibliográficas, el desarrollo metodológico, la investigación empírica, la modelización y el análisis de los interesados. De forma específica, en este documento se presentan diferentes aspectos sobre:

- Metodología de evaluación de la resiliencia, desarrollada en RESONATE.
- Análisis de los puntos críticos (“hotsopots”) de perturbación en bosques de Europa a través del mapa de perturbaciones forestales y cómo se prevé que cambien en el futuro.



- Potencial de las medidas de gestión forestal en la mejora de la resiliencia de los bosques y en las cadenas de valor asociada.
- Análisis de las diferencias entre regiones europeas en la eficacia de la gestión de la resiliencia basándose en casos de estudios, a través de modelización forestal.
- Percepción de la importancia de los retos de la resiliencia para las partes interesadas y comparación de las medidas en tres países (Alemania, España y Finlandia) como estudios de casos y cómo gestionar las posibles compensaciones.

3. Metodología

La metodología del proyecto RESONATE se ha diseñado para abordar de manera integral la resiliencia de los bosques europeos y las cadenas de valor asociadas. En primer lugar, se ha llevado a cabo un inventario de indicadores y métricas de resiliencia forestal, que establece las bases para una evaluación exhaustiva de dichos indicadores y la creación de una guía de referencia que facilite su aplicación. Asimismo, se han analizado algunos conflictos (“*trade-offs*”) entre servicios ecosistémicos con el objeto de establecer balances entre ellos a través de la gestión forestal. En cuanto a la identificación y análisis de perturbaciones, se han desarrollado un mapa en línea de focos de perturbación, un informe sobre los regímenes de perturbación y un mapa de futuros escenarios de perturbación. Para fortalecer la resiliencia de la cadena de valor forestal, se han elaborado informes sobre las opciones de gestión y una lista de factores que contribuyen a la resiliencia, complementados con propuestas para lograr cadenas de valor basadas en bosques resilientes. Además, la interacción con actores interesados se ha fomentado a través de talleres y la creación de un mapa de percepción, asegurando que sus perspectivas fueran consideradas en el proceso. La investigación del proyecto también ha incluido la presentación de enfoques de modelización en estudios de caso regionales, así como un análisis de políticas que evalúa el contexto normativo para fortalecer la resiliencia forestal. Finalmente, se ha realizado una evaluación integrada que considera tanto los sistemas forestales como las cadenas de valor bosque-madera, analizando la capacidad y voluntad de los propietarios forestales para adaptarse a los cambios, y desarrollando una escala de resiliencia de la demanda que oriente las acciones futuras.

A continuación, se detalla la metodología de los diferentes estudios llevados a cabo en el proyecto

3.

a. MARCO DE RESILIENCIA OPERATIVA (ORF): METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA DESARROLLADA EN RESONATE

Para poder evaluar la resiliencia de los sistemas socioecológicos forestales se ha desarrollado un marco de trabajo denominado “Marco de Resiliencia Operativa” (de aquí en adelante ORF por sus siglas en inglés- *Operational Resilience Framework*) (LLORET et al., 2024). Este ORF ha sido la referencia para los trabajos sucesivos que se han desarrollados dentro del proyecto RESONATE.

El ORF está basado en ocho pasos principales que se muestran en la Figura 1 y que



se detallan a continuación:

1. Enfoque de resiliencia: tipos de resiliencia.
 - a. Resiliencia de ingeniería: recuperación de un sistema tras una perturbación a su estado previo a dicha perturbación
 - b. Resiliencia ecológica: cambio máximo que un sistema puede absorber sin pasar a un estado estable alternativo.
 - c. Resiliencia socioecológica: capacidad del sistema socioecológico para reorganizarse, adaptarse y prestar servicios ecosistémicos después de una perturbación o en condiciones de estrés continuado, frecuentemente asociado con transformaciones ambientales y socioeconómicas.
2. Variables del sistema: ¿Resiliencia de qué? Variables cuantitativas que describen las características del sistema socioecológico, las cuales responden a las perturbaciones, los factores de estrés y otros factores coadyuvantes.
3. Estado de referencia: ¿Resiliencia comparado con qué? Escenario que sirve de base para la comparación con el estado del sistema después de una perturbación o bajo estrés.
4. Perturbación/estrés: ¿Resiliencia a qué? Cambios medioambientales o socioeconómicos relevantes que afectan al sistema socioecológico. Estos cambios pueden ser episódicos, graduales o crónicos.
5. Escala espacio temporal: ¿Dónde y cuándo actúa la resiliencia? Extensión temporal en la que se produce la recuperación a las perturbaciones o la respuesta a los factores de estrés y a la cual la resiliencia debe referirse explícitamente. Lo mismo ocurre con la escala espacial.
6. Cofactores: ¿Existen factores que influyan en la resiliencia de qué a qué? Factores que afectan la resiliencia de los sistemas socioecológicos pero que, a diferencia de los predictores de resiliencia, difícilmente pueden manipularse para aumentar dicha resiliencia. Éstos suelen corresponderse con características físicas (por ejemplo, región, clima, intensidad de las perturbaciones) o contextos políticos (por ejemplo, normativas).
7. Métrica de la resiliencia: ¿Cómo se cuantifica la resiliencia? Métodos cuantitativos para medir el comportamiento de la(s) variable(s) de un sistema socioecológico en respuesta a perturbaciones o factores de estrés. Esta medición implica algún tipo de comparación de la(s) variable(s) del sistema tras la perturbación o bajo estrés respecto a un estado de referencia.
8. Predictores de resiliencia: ¿Existen parámetros que permitan predecir la resiliencia, y que puedan modificarse/manejarse para aumentarla? Los predictores de resiliencia reflejan los mecanismos subyacentes del funcionamiento del sistema y proporcionan estimaciones de la resiliencia prospectiva. Son susceptibles de ser intervenidos de cara a mejorar la resiliencia del sistema.

Seguidamente, se desarrolló un inventario basado en una extensa revisión bibliográfica de indicadores y otros parámetros relacionados con la resiliencia, de acuerdo con el ORF. Se identificaron indicadores y métricas de resiliencia (lista completa en Anexo 1 de HURTADO et al., 2022) Una vez identificados se realizó un inventario de ambos agrupándolos en dos categorías: indicadores cuantitativos y no cuantitativos (HURTADO et al., 2022). Finalmente para la evaluación de



conflictos se utilizó la Clasificación Internacional Común de Servicios de los Ecosistemas (CICES) V.4.3 y se completó con los datos disponibles de las siguientes bases de datos INForest <https://forest-data.unece.org/Indicators>; Forest Europe <https://forest.eea.europa.eu>; FRA <https://fra-data.fao.org>; Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/>.

3.

a. b. **ANÁLISIS DE LOS FOCOS DE PERTURBACIÓN EN EUROPA Y COMO SE PREVEE SU EVOLUCIÓN**

Evolución de áreas forestales perturbadas en Europa

Para poder identificar las áreas con elevada perturbación ("*hotspots*") de los bosques europeos, se creó un mapa interactivo virtual que visualiza dichas áreas a partir de metodologías desarrolladas con base a imágenes Landsat. Se calcularon siete indicadores anuales de régimen de perturbaciones:

- Tasa total de perturbación (porcentaje del área forestal perturbada por año).
- Frecuencia total de perturbación (número de parches perturbados - i.e. grupos continuos de píxeles perturbados que comparten un borde o esquina- por hectárea y año dentro de un hexágono).
- Tamaño promedio de los parches perturbados.
- Tamaño máximo de los parches perturbados (percentil 99).
- Prevalencia anual de perturbaciones por agentes bióticos/viento.
- Prevalencia de perturbaciones por incendios.
- Prevalencia de perturbaciones por aprovechamiento maderero.

Estos indicadores se calcularon a nivel regional usando un modelo de celdas hexagonales de 50 x 50 km, lo que permitió un análisis detallado por zonas y a lo largo del tiempo. El mapa consta de una herramienta de visualización interactiva que permite localizar los casos de estudio RESONATE y verlos en relación a otros regímenes de perturbación en Europa. El mapa se utilizó para: (i) poder visualizar cómo han cambiado las alteraciones planificadas y no planificadas en los bosques europeos desde mediados de la década de 1980 y (ii) ver si estos cambios están relacionados entre sí.

3.

a.

i. **Mapa online de futuros escenarios de perturbación para los bosques europeos**

Para explorar la aplicación del mapa virtual en posibles futuras perturbaciones se seleccionó el periodo 2021-2100. Se utilizó la dinámica forestal a través del marco de "*Scaling Vegetation Dynamics*" (SDV) para crear escenarios de perturbaciones futuras considerando tres agentes de perturbación natural (viento, fuego y escolítidos). Las simulaciones incluyeron módulos para estos agentes, integrando datos históricos y relaciones dinámicas entre estado del bosque, clima y perturbaciones.

Se analizaron tres escenarios climáticos, basados en trayectorias de concentración



representativa (RCP): RCP2.6 (reducción de emisiones); RCP4.5 (emisiones intermedias); RCP8.5 (emisiones altas). Se realizaron un total de 45 simulaciones (5 réplicas por modelo de perturbación -3- y escenario climático -3-). Los indicadores utilizados fueron (1) tasa de perturbación i.e. porcentaje anual de cobertura forestal perturbada, y (2) turno forestal i.e. tiempo hasta que el área acumulada perturbada iguala el área forestal inicial.

3.

a. SILVICULTURA ADAPTATIVA: OPCIONES PARA MEJORAR LA RESILIENCIA FORESTAL.

Se llevó a cabo una extensa revisión bibliográfica para evaluar qué opciones de adaptación silvícola aplicadas hasta la fecha han mejorado la resiliencia forestal y se realizó un metaanálisis sobre las evidencias de resiliencia de masas forestales gestionadas frente a las no gestionadas. Se analizaron tres tipos de gestión: (1) claras/clareos, (2) bosques mixtos; (3) cese de gestión forestal activa, es decir, dejar que los bosques evolucionen de manera natural sin intervención humana

3.

a. MODELOS Y CASOS REGIONALES

Paralelamente, se realizaron modelos de producción en ocho casos de estudios del proyecto. Estos casos de estudio fueron seleccionados estratégicamente para representar la diversidad ecológica, climática y socioeconómica de los bosques europeos, abarcando regiones desde la cuenca mediterránea hasta las regiones boreales, incluyendo regiones atlánticas y continentales. Cada región se enfrenta a desafíos específicos de resiliencia definidos por el marco de trabajo de RESONATE (ORF), centrado en las preguntas clave: “¿resiliencia de qué?” y “¿resiliencia a qué?”. Un resumen de los casos seleccionados y los retos abordados en cada uno de ellos se muestran en la *Tabla 1*.

Además de sus especificidades, los casos de estudio abordaron también retos de resiliencia comunes:

- Cambio en la idoneidad de especies arbóreas: Análisis del impacto del cambio climático en la adaptación de las especies actuales.
- Incremento de perturbaciones naturales: Evaluación de cómo eventos extremos como incendios, plagas o tormentas, según el caso, afectan la estabilidad del sistema forestal.
- Cambio en las demandas sociales: Identificación de cómo las necesidades humanas influyen en la gestión y la resiliencia forestal.
- Declive de biodiversidad: Monitoreo del impacto del cambio climático y las prácticas de manejo en la diversidad de especies y su distribución.

Una vez identificados y definidos los casos de estudio del proyecto, se realizaron simulaciones de los escenarios climáticos y perturbaciones naturales de cada uno de ellos con el objeto de mejorar la resiliencia de los bosques. Se modelaron escenarios futuros utilizando herramientas específicas para cada región, como MEDFATE, LandClim e I-Land (PATAcca et al. 2024) y se añadieron cuatro enfoques diferentes de gestión forestal (narrativas de gestión):

- Gestión habitual (BAU): Continuación de las prácticas actuales.



- Aumento de la protección (IP): Aumento de áreas protegidas en un 30%.
- Bioeconomía (BIO): Intensificación de la gestión forestal para fines económicos.
- Adaptación al cambio climático (CCA): Ajustes en la composición de especies y prácticas para mitigar riesgos.

La evaluación de la resiliencia se hizo a través de tres indicadores: stock de madera (GS), biodiversidad y mortalidad en cada uno de los diferentes escenarios climáticos (histórico, RCP 4.5 y RCP 8.5)

3.

a. ANALISIS DE POSIBLES VIAS PARA MEJORAR LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE VALORES FORESTAL

Para identificar vías de mejora en la resiliencia de la cadena de valor forestal, RESONATE aplicó un enfoque multidimensional que combina análisis histórico, modelización, percepción de actores y escenarios prospectivos. Se exploraron indicadores clave como la estabilidad del suministro, los precios de la madera y la capacidad de procesamiento industrial. Además, se emplearon modelos con diferentes niveles de complejidad espacial y económica para simular cómo variaciones climáticas y de gestión afectan a la cadena de suministro. Paralelamente, se analizó la percepción de actores del sector sobre medidas de adaptación y se identificaron narrativas dominantes sobre el cambio climático y el uso del bosque. Finalmente, se investigaron innovaciones tecnológicas y organizativas, así como estrategias de manejo adaptativo, evaluando su efecto potencial sobre la resiliencia futura del sistema en distintos contextos territoriales.

El análisis de la cadena de valor forestal se realizó a través de una revisión bibliográfica sistemática entre 2013 y 2022. Los temas abarcados fueron: innovación, bioeconomía, adaptación al cambio climático y silvicultura. Los estudios seleccionados se analizaron para clasificar las vías de innovación y evaluar su capacidad para fortalecer la resiliencia. También se analizó el impacto de estas vías en la resiliencia de los bosques y la cadena de valor frente al cambio climático. Los conceptos clave considerados fueron: (i)Resiliencia forestal y de la cadena de valor (Capacidades de absorción, recuperación y reorganización ante perturbaciones), (ii)Predictores de resiliencia: Diversificación, eficiencia y flexibilidad.

3.

a. ENFOQUE SOCIOECOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE RESILIENCIA FORESTAL

Para abordar la resiliencia desde una perspectiva socioecológica amplia, RESONATE desarrolló un enfoque metodológico que integra tanto el análisis de la resiliencia de la demanda social de servicios ecosistémicos como la priorización de desafíos y medidas de resiliencia mediante evaluación participativa. En primer lugar, se construyó un modelo teórico de resiliencia de la demanda basado en la capacidad de sustitución y la magnitud del servicio demandado, inspirado en el ORF y en enfoques económicos. Este modelo fue contrastado empíricamente mediante encuestas y literatura secundaria, identificando los servicios más vulnerables (como los reguladores y no comercializados) y estableciendo una



jerarquía según su flexibilidad ante perturbaciones. Paralelamente, se aplicó un análisis multicriterio en tres países (Finlandia, Alemania y España), a través de un panel de expertos de la cadena de valor forestal (industria, propietarios, e investigadores), para identificar prioridades contextuales en retos y estrategias de resiliencia. Esta combinación de métodos permitió incorporar tanto dimensiones cuantitativas como cualitativas, integrando percepciones sociales, valores económicos y condiciones ecológicas regionales para fundamentar recomendaciones adaptadas de política y gestión forestal.

4. Resultados

4.

a. INDICADORES Y METRICAS DE RESILIENCIA

La revisión bibliográfica reveló que las variables de sistema más utilizadas pertenecen a la estructura forestal, la biodiversidad y el funcionamiento de los bosques, seguidas del uso del suelo. En cuanto a los predictores de resiliencia, las categorías más comunes resultaron ser los de estructura forestal, composición forestal, gestión forestal y biodiversidad, seguidas del uso del suelo, herbivoría y funcionamiento del bosque.

En cuanto a la relación entre los indicadores de resiliencia, la revisión bibliográfica identificó que siete predictores de resiliencia de cuatro grandes categorías (composición del bosque, estructura del bosque, gestión y biodiversidad) están presentes en más del 10% de los 303 estudios revisados. Estos siete predictores explican significativamente al menos una variable del sistema en más del 50% de los casos, principalmente en referencia al de cambio climático y en regiones templadas.

La revisión bibliográfica reveló que las métricas más utilizadas en los estudios se agrupan en las siguientes categorías: índices de recuperación, significación estadística de diferencias, análisis de trayectorias, medidas de estabilidad y variabilidad entre otras “no especificada”. Por otro lado, a evaluación llevada a cabo por los actores interesados indica que los predictores ecológicos de resiliencia mejor puntuados fueron: estructura forestal, identidad de especies arbóreas y estado de protección.

. La Tabla 2 presenta los resultados del análisis bibliográfico llevado a cabo a lo largo del proyecto, sobre los conflictos (*trade-offs*) relacionadas con los bosques, las diferentes perspectivas subyacentes y las posibles sinergias. Por ejemplo, se manifiesta el conflicto que surge entre la biodiversidad y la bioeconomía cuando la intensificación de la gestión forestal para la producción de madera impacta negativamente en otros servicios ecosistémicos, como la biodiversidad. Los estudios sugieren que los bosques mixtos, en particular, ofrecen mayor resiliencia frente a perturbaciones y beneficios para la biodiversidad, lo que refuerza su papel como una solución viable.

4.

a. b. MAPAS Y ANÁLISIS DE PERTURBACIONES Y SU DESARROLLO A



LO LARGO DEL TIEMPO

i. Evolución de áreas forestales perturbadas en Europa

Se ha desarrollado un mapa interactivo virtual que permite explorar las variaciones espaciales y temporales de las perturbaciones forestales en Europa, y sirve como base para identificar "hotspots" de una manera interactiva en la que los usuarios pueden comparar indicadores para diferentes años y evaluar si los sitios de estudio del proyecto RESONATE son representativos de las perturbaciones forestales europeas para su región. En el análisis preliminar de estos productos se observa que perturbaciones, como los ataques de escolítidos y los eventos de viento extremo, tienden a ocurrir conjuntamente. El análisis de las limitaciones de estos productos indica que algunas perturbaciones más difusas y progresivas (ej. sequías) no son detectables debido a las limitaciones de resolución de los datos satelitales.

-

4.

El análisis sobre los regímenes de perturbación de los bosques europeos y sus cambios a lo largo del tiempo pusieron de manifiesto que cerca del 15% de las perturbaciones forestales en Europa son naturales (incendios; viento/escolítidos) y que éstas han aumentado, representando un 19% de las aperturas de dosel arbóreo en 2020. Las perturbaciones humanas (explotación maderera) son más frecuentes, pero de menor tamaño en comparación con las naturales.

Las perturbaciones naturales dominan en Europa central y del sur. Siendo el viento/escolítidos más relevante en Europa central y los incendios lo son en Europa del sur. En cuanto a las perturbaciones humanas, los mayores impactos se encontraron en Fenoescandinavia. Las tasas y frecuencias más altas se encontraron en las perturbaciones debidas al factor humano (explotación maderera), mientras que los mayores tamaños de perturbación fueron debidos a las naturales (incendios y viento/escarabajo de la madera). Finalmente, se vio que las políticas de gestión y factores biofísicos tienen una gran influencia en los regímenes de perturbación. Otro factor influyente es la diferencia entre países, que explica hasta un 30%, resultando ser más influyente para las perturbaciones humanas que para las naturales.

Los resultados del análisis de perturbaciones futuras se muestran en la Tabla 3. Las simulaciones revelaron que, de forma general, las zonas con mayor diversidad de especies arbóreas mostraban una mayor recuperación y resistencia a las perturbaciones provocadas por las tormentas, mientras que la diversidad funcional mejoraba tanto la resistencia como la recuperación. Sin embargo, al analizar cómo variaban estos efectos con el clima, se observó que la diversidad aumentaba significativamente la resistencia y la resiliencia sólo en condiciones climáticas estresantes (cálidas y secas o frías y húmedas). Además, se observó que la resiliencia a las tormentas estaba fuertemente influida por la posición media de los conjuntos de especies. En particular se observó que los bosques dominados por especies nativas fueron más resistentes y resilientes, pero mostraron una menor recuperación en comparación con los conjuntos dominados por especies de crecimiento rápido.

4.



a. c. SILVICULTURA ADAPTATIVA: OPCIONES PARA MEJORAR LA RESILIENCIA

i.

- A partir de la revisión bibliográfica realizada sobre las distintas opciones de gestión forestal orientadas a mitigar los efectos de las perturbaciones (WILLIG et al., 2025), se observa que los resultados varían según el contexto y el tipo de intervención. En el caso de los clareos, no se encontró evidencia concluyente de que esta práctica reduzca significativamente la mortalidad arbórea asociada a eventos de sequía, si bien tampoco se identificaron efectos negativos directos en términos de incremento del riesgo. No obstante, sí se reconocen beneficios potenciales como la promoción de regeneración natural y la reducción del riesgo de pérdida total del bosque frente a perturbaciones intensas. Por otro lado, los bosques mixtos, caracterizados por una mayor diversidad de especies, mostraron una tendencia general a mejorar la resistencia frente a diversos tipos de perturbaciones, como sequías, herbivoría, viento y patógenos. Sin embargo, estos efectos positivos están condicionados por factores como la composición específica de especies, las características del sitio y la intensidad del disturbio. En situaciones particulares, la diversidad podría intensificar la competencia por recursos y, paradójicamente, reducir la resistencia del ecosistema. En cuanto al cese de la gestión activa, la literatura revisada sugiere que los bosques no intervenidos presentan, en general, una mayor vulnerabilidad debido al aumento de la competencia intraespecífica. Asimismo, la ausencia de intervención puede limitar la capacidad adaptativa de los ecosistemas forestales ante el cambio climático, especialmente en aquellos sistemas homogéneos o dominados por especies mal adaptadas a las nuevas condiciones ambientales

4.

a. d. MODELOS Y CASOS REGIONALES

i. **Escenarios climáticos y perturbaciones naturales de cada uno de ellos con el objeto de mejorar la resiliencia de los bosques**

El análisis de la resiliencia forestal ante distintos escenarios de cambio climático y perturbaciones naturales mostró patrones encontrados en función del tipo de gestión y del contexto regional. En cuanto a la existencia de madera en pie (growing stock), la mayoría del caso de estudio mostraron una tendencia creciente en todos los escenarios analizados, salvo en el caso de la región alemana, donde se registró una disminución significativa. Los enfoques basados en adaptación al cambio climático (CCA) y bioeconomía (BIO) demostraron mayor capacidad para estabilizar las fluctuaciones en la cantidad de madera disponible, en comparación con los escenarios de gestión convencional (BAU) o intensiva (IP), que presentaron una mayor variabilidad interanual.

En lo referente a la mortalidad forestal asociada al clima y a perturbaciones naturales, se observó un incremento generalizado bajo escenarios climáticos más extremos, como el RCP 8.5. Sin embargo, los modelos proyectan que estrategias de manejo bajo el enfoque CCA podrían atenuar significativamente esta mortalidad, gracias a la introducción de especies arbóreas mejor adaptadas y a cambios estructurales que aumentan la robustez de los sistemas forestales.

Por último, los impactos sobre la biodiversidad mostraron una fuerte dependencia



del contexto local. Mientras que en Cataluña y en Kostelec (República Checa) las estrategias CCA generaron efectos positivos sobre la biodiversidad, en Bauges (Francia) se proyectó una disminución de la misma, independientemente del tipo de gestión implementado

8. 4

9. e. ANÁLISIS DE POSIBLES VIAS PARA MEJORAR LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE VALORES FORESTAL

a. **Evaluación integrada de la resiliencia en los sistemas forestales y las cadenas de valor bosque-madera**

Los resultados de la evaluación integrada destacan las prioridades y medidas clave para fortalecer la resiliencia forestal en Europa. Entre los desafíos priorizados, la pérdida de biodiversidad destacó como el desafío más crítico, seguido por la necesidad de adaptar las especies arbóreas al cambio climático. En contra, la demanda social fue considerada como el desafío menos prioritario. Respecto a las medidas de resiliencia, el aumento del área de bosques protegidos lideró las preferencias, seguida por la promoción de bosques mixtos y la creación de empleo en la cadena de valor forestal. Por el contrario, el aumento de talas claras fue la opción menos favorecida, debido a su impacto adverso en la biodiversidad y los ecosistemas.

Los resultados diferenciados entre grupos de expertos reflejan la diversidad de perspectivas: los representantes de la industria priorizaron los bosques mixtos y el empleo, mientras que investigadores y ONGs enfatizaron la protección forestal y la biodiversidad. Los propietarios de bosques, por su parte, compartieron prioridades similares a las de los investigadores, resaltando el interés en enfoques sostenibles y conservacionistas. Estos hallazgos subrayan la utilidad de los modelos de simulación para identificar estrategias integradas que equilibran intereses diversos y maximizan la resiliencia de los sistemas forestales.

4.

Según el análisis de la escala de resiliencia de la demanda, los servicios más resilientes incluyen los servicios recreativos, los productos forestales no madereros (NWFP) y la madera (Figura 2). El control de erosión y la regulación hídrica resultaron los servicios menos resilientes, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar estrategias específicas para su protección y fortalecimiento. A continuación, se detalla la evaluación de los servicios de provisión, regulación y culturales:

Servicios de provisión

- Madera: Se considera moderadamente resiliente, ya que cuenta con sustitutos como materiales alternativos y madera importada. Sin embargo, su resiliencia depende de las dinámicas del mercado y las capacidades de manejo local.
- Productos forestales no madereros (NWFP): Estos incluyen frutos, setas, resinas, miel y otros productos derivados de los bosques. Se destacan por su alta resiliencia, especialmente en áreas donde su relevancia económica es menor. Su diversificación contribuye a una mayor estabilidad frente a perturbaciones.
- Biomasa y leña: Presentan una resiliencia media, ya que pueden ser



reemplazadas por otras fuentes de energía renovable, aunque esta sustitución varía según el contexto local y la infraestructura disponible.

Servicios de regulación

- Secuestro de carbono: Muestra una alta resiliencia debido a la disponibilidad de alternativas tecnológicas (como sistemas de captura y almacenamiento) y soluciones basadas en la naturaleza (ej. reforestación y bosques mixtos).
- Control de erosión y regulación hídrica: Son los servicios menos resilientes, principalmente por la ausencia de sustitutos efectivos a nivel local, lo que aumenta su vulnerabilidad frente a perturbaciones.

Servicios culturales

- Recreación: Exhibe alta resiliencia, ya que existen sustitutos como otras áreas naturales, actividades culturales y recreativas no forestales. Su adaptabilidad está respaldada por una amplia oferta de alternativas.
- Importancia histórica y espiritual: Tiene baja resiliencia debido a la especificidad y singularidad de los sitios asociados, que no pueden ser fácilmente reemplazados.

4.

a. ENFOQUE SOCIOECOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE RESILIENCIA FORESTAL

i.

El análisis multicriterio sintetizó y comparó los resultados globales incluyendo todos los grupos de expertos en Alemania, España y Finlandia. Cada uno de los tres países tenía un reto de resiliencia diferente que se consideró el más importante. Se observó que cuanto mayor es la ponderación de la prioridad, mayor es la importancia del reto de resiliencia en cuestión. Los resultados (Figura 4) mostraron que en Finlandia, el declive de la biodiversidad se percibe como el reto más importante con una ponderación de prioridad de 0,36, mientras que en España y Alemania, se percibe sólo como el segundo más importante con ponderaciones de prioridad de 0,27. En España, el riesgo de perturbaciones forestales recibió la mayor importancia (0,37), mientras que en Alemania y Finlandia sólo fue la tercera más importante con ponderaciones de prioridad de 0,26 y 0,19. La adecuación de las especies arbóreas recibió la mayor importancia (0,36) en Alemania y, fue considerado relativamente importante en Finlandia y España con ponderaciones de 0,29 y 0,27. Los cambios en la demanda social (aumento de la demanda de materias primas para las necesidades de la bioeconomía) se consideraron los menos importantes en los tres países, con ponderaciones prioritarias de 0,09-0,15.

En Galicia, los propietarios forestales demostraron una mayor disposición a aceptar contratos destinados a la conservación de la biodiversidad, en comparación con aquellos enfocados en la prevención de incendios forestales. Entre las preferencias destacadas se encuentran la plantación de especies nativas y el establecimiento de áreas protegidas. Sin embargo, se identificó que las áreas más extensas requieren compensaciones económicas más elevadas para garantizar la participación de los propietarios. A pesar de estas iniciativas, los principales obstáculos señalados incluyen los altos costos asociados a los cambios propuestos y la incertidumbre sobre los beneficios que dichas medidas podrían generar a largo plazo.



En la República Checa, los propietarios mostraron una disposición a pagar un promedio de 8 EUR/ha/año por seguros contra daños de plagas, como los escoltídos, lo que resalta su preocupación por los impactos de estos disturbios. Además, valoraron significativamente la inclusión de materiales educativos, asistencia técnica para el monitoreo y flexibilidad en las compensaciones basadas en los precios de la madera. No obstante, el tamaño reducido de las parcelas y la falta de coordinación entre propietarios se identificaron como limitantes clave para lograr una colaboración efectiva.

5. **Discusión**

5.

a. INDICADORES Y METRICAS DE RESILIENCIA

La evaluación de los actores principales (interesados) respalda el valor de la biodiversidad (composición e identidad de las especies), y en menor medida de la biomasa del rodal y la edad de los árboles, como predictores de la resiliencia forestal en los bosques europeos. Curiosamente, el creciente interés de la literatura académica por la importancia de la diversidad funcional no parece haberse trasladado aún a los actores interesados. En general, la percepción de los actores interesados tiende a reconocer el estatus de protección de los bosques como una forma operativa sólida de mejorar la resiliencia forestal, incluso más que las propias prácticas silvícolas. Esta apreciación sobre la importancia del estatus de protección parece infravalorada en los estudios académicos sobre resiliencia de los bosques (HURTADO et al., 2022; JAIME et al., 2022).

Respecto a los indicadores de resiliencia socio-económica, la revisión bibliográfica proporcionó patrones claros, ya que la mayoría de los trabajos reportaban a casos de estudio particulares. Según la evaluación de los actores principales, se pudo establecer un conjunto de posibles relaciones entre los predictores de resiliencia socioeconómica y las variables del sistema que podrían explicar la resiliencia de la cadena de valor forestal en el escenario actual de cambio climático. En general, los indicadores de la resiliencia de las variables socioeconómicas corresponden a procesos basados en el uso del suelo (protección, conservación y gestión), la dinámica forestal (deforestación, expansión forestal, corta de recuperación) y la inversión en silvicultura.

En cuanto a las metodologías aplicadas para estudiar la resiliencia de los bosques, prevalecen las basadas en datos empíricos obtenidos a partir de observaciones de campo o de estudios experimentales, lo que pone de relieve el alcance específico de gran parte de la información disponible. La teledetección también se está convirtiendo en una fuente habitual de información para cubrir grandes territorios, pero con una capacidad limitada para evaluar predictores a nivel de rodal, ya que las metodologías de alta resolución (por ejemplo, LIDAR) aún no se han aplicado con regularidad para estudiar la resiliencia de los bosques. Los estudios experimentales sobre resiliencia son también bastante escasos, probablemente debido a las dificultades para llevar a cabo manipulaciones a nivel de rodal forestal y, finalmente, los experimentos en invernadero o vivero son muy escasos. Sorprendentemente, el uso de simulaciones con modelos ha sido poco



utilizado hasta ahora, a pesar de su valor para evaluar la resiliencia futura en escenarios de cambio climático o de diferente régimen de gestión. El escaso número de metaanálisis realizados puede explicarse por su dependencia de un número mínimo de estudios empíricos que todavía no están disponibles (HURTADO et al., 2022; JAIME et al., 2022). Por último, los estudios teóricos no son escasos, pero no proporcionan evaluaciones cuantitativas que impliquen medidas directas de la resiliencia de las variables del sistema,

Los datos disponibles sobre los productores forestales no madereros (bayas, frutos secos, miel, resina), son en su mayoría incompletos y difíciles de comparar y no se han podido utilizar en el análisis de las cadenas de valor. Por ejemplo, los datos disponibles sobre productos no madereros de la base de datos Forest Europe (<https://forest.eea.europa.eu>) probablemente está infravalorado, ya que representan sólo una pequeña parte de todos los bienes consumidos (LINSER et al., 2023).

5.

a. MAPAS Y ANÁLISIS DE PERTURBACIONES

El mapa virtual desarrollado y el análisis de las perturbaciones a través de él proporcionan una visión integral de los regímenes de perturbación forestal en Europa, incluyendo sus características históricas, proyecciones futuras y su relación con la resiliencia de los bosques y las cadenas de valor asociadas.

5.

a.

i. **Mapa virtual de los focos de perturbación**

El desarrollo de mapas interactivos para explorar los puntos críticos de perturbación (SENF y SEIDL, 2020) y los escenarios futuros (GRÜNIG et al., 2024) ofrece una herramienta valiosa para identificar tendencias y áreas prioritarias para la intervención. Estas herramientas permiten a los usuarios visualizar las dinámicas espaciales y temporales de las perturbaciones, compararlas con datos históricos y evaluar su representatividad como se vio con el ejercicio realizado en los casos de estudios del proyecto RESONATE. Además, la integración de modelos avanzados, como el *Scaling Vegetation Dynamics* (SVD), añade un enfoque innovador al simular interacciones dinámicas entre el clima, la vegetación y las perturbaciones (SENF et al., 2022a).

El análisis pan-Europeo de los regímenes de perturbación (SENF y SEIDL, 2022) destaca que solamente el 15% de las perturbaciones en los bosques europeos son de origen natural (ej. viento y escolítidos), aunque su contribución ha aumentado significativamente en los últimos años. También se vio que éstos eventos naturales suelen ser menos frecuentes pero más grandes que las perturbaciones humanas, como las explotaciones madereras, que son más pequeñas pero ocurren con mayor frecuencia. La variabilidad espacial observada está fuertemente influenciada por factores biofísicos (topografía, clima y biogeografía) y por diferencias en políticas y gestión entre países. Esto subraya la importancia de integrar tanto factores naturales como humanos en el diseño de estrategias de resiliencia (SENF et al., 2022b).



5.

a.

i. Mapa online de futuros escenarios de perturbación para los bosques europeos

Incluso en el mejor de los escenarios, las perturbaciones seguirán siendo mayores de lo que han sido históricamente a lo largo del siglo XXI. Si el calentamiento sigue su curso actual, es probable que se produzca un nuevo aumento de las perturbaciones en el futuro. En concreto, las perturbaciones a escala continental se habrán duplicado a finales de siglo en un escenario de cambio climático sin cambios. Los incendios forestales son los que más han contribuido a este aumento, y también las perturbaciones provocadas por los escarabajos de la corteza han aumentado claramente con el calentamiento del clima. Un análisis específico sobre la sensibilidad climática de los incendios forestales subrayó su fuerte sensibilidad a condiciones más cálidas y secas, con una probabilidad de incendios extremos que aumentaría más del doble a finales de siglo, y un clima cada vez más propicio a los incendios forestales también en los biomas templados y boreales (GRÜNIG et al., 2023); Es importante señalar que los cambios previstos en las perturbaciones difieren en toda Europa: Los bosques templados y mediterráneos fueron los más afectados por los cambios en las perturbaciones inducidas por el clima en las simulaciones. Por tanto, es en estas zonas donde son más necesarias las medidas de adaptación a tasas de perturbación más elevadas y de fomento de la resiliencia frente a las perturbaciones. Los análisis también muestran que el cambio en los regímenes de perturbaciones afecta sustancialmente a la estructura de los bosques europeos, con importantes implicaciones para la biodiversidad forestal. Por ejemplo, se prevé que los bosques viejos disminuyan considerablemente en el futuro. Estas proyecciones reflejan una necesidad urgente de adaptar las estrategias de manejo forestal para mitigar impactos futuros, especialmente en regiones más vulnerables como Europa Central y Meridional.

5.

5.

a. MODELOS Y CASOS REGIONALES

i. Escenarios climáticos y perturbaciones naturales de cada uno de ellos con el objeto de mejorar la resiliencia de los bosques

El cambio climático tiene un impacto significativo en la resiliencia de los sistemas forestales, especialmente en especies mal adaptadas a condiciones futuras. En escenarios de gestión convencional (BAU) y protección intensiva (IP), estas especies son más vulnerables, lo que pone en riesgo la estabilidad del ecosistema. En contraste, los enfoques de adaptación al cambio climático (CCA) y bioeconomía (BIO) demuestran una mayor eficacia, ya que permiten ajustar la composición de especies para enfrentar mejor las condiciones climáticas emergentes (PATACCA et al., 2024).

Sin embargo, los modelos utilizados para evaluar estas dinámicas enfrentan limitaciones importantes. La simulación de eventos extremos, como sequías prolongadas, y su interacción con otras perturbaciones aún representa un desafío



ya que los modelos están basados en datos climáticos históricos que no se corresponden con lo que estamos viviendo hoy en día. Estas restricciones subrayan la necesidad de desarrollar herramientas más precisas que puedan capturar mejor la complejidad de estos fenómenos y sus impactos acumulativos.

En el ámbito socioeconómico, las narrativas de bioeconomía han mostrado ser más efectivas en regiones productivas, como Galicia, donde la explotación forestal contribuye significativamente a la economía local. Por el contrario, en áreas menos productivas, los enfoques basados en la protección de los bosques ofrecen mejores resultados, evidenciando la importancia de adaptar las estrategias de manejo a las características y necesidades específicas de cada región.

5.
 - a. ANÁLISIS DE POSIBLES VÍAS PARA MEJORAR LA RESILIENCIA EN LA CADENA DE VALORES FORESTAL (LUDVIG et al., 2023) Es fundamental fortalecer la coordinación entre las políticas y promover una mayor colaboración entre los sectores involucrados para abordar los desafíos relacionados con la resiliencia en las cadenas de valor forestal (LUDVIG et al., 2023). Se identificaron cuatro estrategias principales relacionadas con la resiliencia: el Pacto Verde Europeo (*Green deal*), la Estrategia de Biodiversidad de la UE 2030, la Estrategia de Bioeconomía y la Estrategia Forestal para 2030. Estas estrategias tienen objetivos ambiciosos, como aumentar la biodiversidad, reducir emisiones de carbono y fomentar una bioeconomía sostenible. Sin embargo, las interacciones entre estas políticas a menudo generan tensiones, lo que resalta la necesidad de enfoques más coordinados e integradores. En los talleres realizados, los participantes discutieron las tensiones entre la resiliencia económica y ecológica. Por ejemplo, mientras que algunos actores valoran la producción de madera como parte de una bioeconomía descarbonizada, otros priorizan la conservación de la biodiversidad. Estas tensiones reflejan diferentes enfoques hacia la gestión de los recursos forestales y la importancia de adaptarlos a contextos locales. Por tanto, uno de los principales desafíos es la falta de integración entre las políticas sectoriales, especialmente en términos de alineación entre objetivos económicos, climáticos y de conservación. Esto se ve intensificado por la diversidad en la implementación de políticas a nivel regional y nacional, lo que limita su eficacia. Se torna pues crucial encontrar la manera de adoptar enfoques innovadores que permitan combinar objetivos aparentemente conflictivos, como la conservación y el desarrollo económico. Y en este respecto las herramientas de planificación y las nuevas tecnologías pueden ayudar a facilitar la toma de decisiones basada en datos.
 - b. ENFOQUE SOCIOECOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE RESILIENCIA FORESTAL
 - i.

Los resultados del análisis reflejan la complejidad inherente a la mejora de la resiliencia en los sistemas forestales y sus cadenas de valor. En lo que respecta a las opciones de manejo forestal para mitigar perturbaciones, se ha constatado que su efectividad depende en gran medida de variables contextuales como la



composición de especies, la densidad del bosque y las condiciones locales. En este sentido, prácticas como la promoción de bosques mixtos y un manejo activo muestran un potencial considerable para aumentar la resistencia y resiliencia de los ecosistemas, aunque persisten importantes lagunas de conocimiento que requieren estudios adicionales con metodologías estandarizadas. Además, el monitoreo de bosques no manejados podría ofrecer información relevante para mejorar las estrategias futuras (WILLIG Y BAUHUS, 2023).

A nivel de cadena de valor, los análisis evidencian un desajuste entre las innovaciones que apuestan por la diversificación en la gestión forestal y aquellas centradas en la eficiencia de la industria de transformación. Este desequilibrio subraya la necesidad de una mejor coordinación entre ambos sectores para lograr un verdadero avance en resiliencia y sostenibilidad (BOZZOLAN et al., 2024). Si bien se identifican tensiones —como la aparente contradicción entre producción de madera y objetivos como conservación o uso recreativo— también se destacan importantes sinergias. Por ejemplo, la combinación de estrategias como la promoción de bosques mixtos con la diversificación de productos puede fortalecer la sostenibilidad general de la cadena forestal. En este contexto, se sugiere impulsar enfoques de innovación colaborativa que integren todos los eslabones de la cadena, desde la gestión silvícola hasta la transformación industrial (HOEBEN et al., 2023).

Las percepciones de los actores clave aportan otra capa de análisis fundamental. Los talleres realizados pusieron en evidencia que la capacidad de adaptación varía entre sectores: las plantas de bioenergía, por ejemplo, mostraron mayor flexibilidad ante cambios en la oferta de madera, mientras que los aserraderos presentan una capacidad de reacción más limitada, con horizontes de adaptación que pueden extenderse hasta diez años (HASSEGAWA et al., 2024). Además, se identificó una fuerte competencia por los grandes diámetros de madera, lo que genera tensiones entre distintos segmentos industriales. Estos espacios de diálogo también resaltaron la importancia de subsidios y políticas de apoyo para fomentar medidas de resiliencia dentro de la industria

Desde una perspectiva integrada, las estrategias que promueven bosques mixtos no solo contribuyen a la adaptación climática y la conservación de la biodiversidad, sino que también pueden ofrecer beneficios a lo largo de la cadena de valor. Sin embargo, su implementación sigue siendo un reto, especialmente en contextos industriales que dependen de coníferas. Las prioridades y percepciones respecto a estas medidas varían entre regiones, lo que refuerza la necesidad de enfoques adaptados a condiciones locales. Así, mientras en Finlandia no se identificaron barreras críticas como la red vial o el uso de nuevas especies, estas podrían representar obstáculos importantes en otras regiones como Galicia (SCHMID et al., 2024).

Asimismo, la resiliencia de la demanda varía en función del tipo de servicio ecosistémico. Servicios locales y no comercializados, como la regulación hídrica o la prevención de inundaciones, presentan menor resiliencia debido a la falta de sustitutos, en contraste con servicios globales como el secuestro de carbono, que



tienden a ser más adaptables. Estas diferencias enfatizan la necesidad de diversificar los servicios forestales y aplicar enfoques adaptativos que garanticen su sostenibilidad a largo plazo (LAUTRUP et al., 2023).

Finalmente, la disposición de los propietarios forestales a adoptar medidas de adaptación se ve limitada por múltiples barreras. Aunque muchos reconocen riesgos como incendios o plagas, menos de una cuarta parte prevé modificar sus prácticas actuales. Entre los principales obstáculos figuran los costes económicos, la falta de apoyo gubernamental y la escasa existencia de incentivos claros. La fragmentación de la propiedad, especialmente en regiones como Galicia, agrava la dificultad de coordinar acciones colectivas. Frente a este panorama, se plantea la necesidad de políticas que integren esquemas de compensación, incentivos económicos y formación, con el objetivo de fortalecer la resiliencia mediante una gestión forestal más colaborativa (LAUTRUP et al., 2024).

6. Conclusiones

El proyecto RESONATE, a lo largo de sus cuatro años de vida, ha abordado los desafíos clave de la resiliencia forestal en Europa, integrando conocimientos, herramientas y estrategias para fortalecer los sistemas forestales y sus cadenas de valor frente al cambio climático y las perturbaciones naturales crecientes. Con sus múltiples estudios y talleres, se han identificado las siguientes líneas esenciales de acción:

- Resiliencia forestal como eje central: La promoción de bosques mixtos y la aplicación de prácticas de manejo adaptativo, como la silvicultura cercana a la naturaleza (*close to nature*) y que considera los nuevos escenarios climáticos *climate smart forestry*, se destacan como estrategias clave para mitigar los impactos de sequías, plagas e incendios. Estas prácticas equilibran la conservación de la biodiversidad, la productividad económica y la capacidad de los bosques para absorber carbono.
- Enfoques integrados e innovadores: RESONATE subraya la importancia de integrar políticas adaptativas que combinen la bioeconomía circular, la gestión sostenible y la protección de la biodiversidad. El estudio realizado sobre la cadena de valor resiliente dejó en evidencia que dichas cadenas requieren esfuerzos de mejora en la diversificación, flexibilidad e innovación tanto en la gestión forestal como en las fases industriales.
- Herramientas avanzadas para la toma de decisiones: Los modelos de simulación y mapas virtuales desarrollados permitieron una evaluación precisa de las dinámicas forestales y los efectos de las perturbaciones en escenarios futuros. Estas herramientas han sido fundamentales para validar estrategias adaptativas y diseñar planes de manejo basados en evidencias científicas.
- Perspectivas futuras: El proyecto destaca la necesidad de ampliar los estudios a nuevas regiones, perfeccionar los modelos existentes teniendo presente el marco de resiliencia diseñado en este proyecto (ORF) que resulta crucial para consolidar las estrategias diseñadas y garantizar su adaptabilidad en un entorno cambiante.



En síntesis, el proyecto RESONATE proporciona una base sólida para abordar los retos forestales del futuro, promoviendo un enfoque holístico que combina innovación, sostenibilidad y cooperación. Este marco no solo fortalecerá la resiliencia de los sistemas forestales europeos, sino que también garantizará la sostenibilidad de sus beneficios económicos, sociales y ecológicos a largo plazo.

7. Agradecimientos

Este proyecto ha sido posible gracias al apoyo financiero del proyecto RESONATE H2020-RUR-2020-2 de la Unión Europea (subvención nº 101000574) y a todo el esfuerzo individual y conjunto de las y los compañeros que han trabajado dentro de los 17 socios que conforman el consorcio de RESONATE.

8. **Bibliografía** ASADA, R., HOEBEN, A., HURMEKOSKI, E., TOPPINEN, A., PATACCA, M., STERN, T. (2022). Results of the statistical analysis of national and some regional forest-based value chains regarding historical resilience. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, [UH]. BOZZOLAN, N.; PATACCA, M.; HASSEGAWA, M. 2024. Deliverable 3.6. Assessment of management options for achieving resilient forest-based value chain, project no. 101000574, Wageningen University & Research, European Forest Institute. FAO (2022): Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management, online: <https://www.fao.org/4/x8080e/x8080e06.htm> (Acceso 15.01.2025) GRÜNIG, M., RAMMER, W., SENF, C., SEIDL, R. 2024. Deliverable 4.3. Online map of future disturbance scenarios for Europe's forests. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, Technical University of Munich HASSEGAWA, M.; BOZZOLAN, N.; PATACCA, M. 2023. Deliverable 3.4. Validation of the resilience value chain framework and management options. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, WR and EFI. HOEBEN, A. D.; STERN, T.; LLORET, F.; 2023. A Review of Potential Innovation Pathways to Enhance Resilience in Wood-Based Value Chains. *Current Forestry Reports*, 9(5), 301–318. <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00191-4> HURTADO, P., ESPELTA, J.M., LLORET, F., 2022. Deliverable 1.1. Inventory of forest resilience indicators and metrics reported in the literature with an assessment on their applicability to RESONATE case studies. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, CREAM and EFI (coordinator). JAIME, L., ESPELTA, J.M., HURTADO, P., LLORET, F. 2023. Deliverable 1.2. Resilience indicators and metrics assessment. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, CREAM and EFI (coordinator). JANKOVSKÝ M., GARCÍA-JÁCOME S.P., NUHLÍČEK O., LÖWE R., DVOŘÁK J., STERN T., HOEBEN A. (2022). Predictors and co-drivers associated with the resilience of forest value chains: a local perspective. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, [CZU]. LAUTRUP, M., LUNDHEDE, T., MARTÍN, J.P., JANKOVSKÝ, M., JACOBSEN, J.B. 2024. Deliverable 4.7. Forest owner's ability and willingness to adapt to changes. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, University of Copenhagen. LAUTRUP, M., LUNDHEDE, T., JACOBSEN, J.B. 2023. Deliverable 4.6. Demand resilience ladder. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, University of Copenhagen. LLORET, F.; HURTADO, P.; ESPELTA, J. M.; JAIME, L.; NIKINMAA, L.; LINDNER, M.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; 2024. ORF, an operational framework to measure resilience in social-ecological systems:



the forest case study. *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01518-1> LUDVIG, A., LINSER, S., SCHMID, B. 2023. Deliverable 1.4. Trade-offs assessment. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, University of Natural Resources and Life Sciences [BOKU]. LUDVIG, A., SCHMID, B., HURMEKOSKI, E.; KUNTTU, J., TOPPINEN, A. 2023. Deliverable 5.2. Report on Policy Analysis for Forest Resilience. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU) and University of Helsinki (UH). LLORET, F.; HURTADO, P.; ESPELTA, J. M.; JAIME, L.; NIKINMAA, L.; LINDNER, M.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; 2024. ORF, an operational framework to measure resilience in social–ecological systems: the forest case study. *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01518-1> NAGEL, T. A.; MIKAC, S.; DOLINAR, M.; KLOPCIC, M.; KEREN, S.; SVOBODA, M.; DIACI, J.; BONCINA, A.; PAULIC, V.; 2017. The natural disturbance regime in forests of the Dinaric Mountains: A synthesis of evidence. *Forest Ecology and Management*, 388, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.047> NIKINMAA, L.; LINDNER, M.; CANTARELLO, E.; JUMP, A. S.; SEIDL, R.; WINKEL, G.; MUYS, B.; 2020. Reviewing the Use of Resilience Concepts in Forest Sciences. *Current Forestry Reports*, 6(2), 61–80. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00110-X/FIGURES/5> PATACCA, M., UZQUIANO, S., BOZZOLAN, N., SCHELHAAS, MJ., MARTINEZ-VILLALTA, J., ESPELTA, J.M., D’ADAMO, F., PICOS, J., ALONSO MARTINEZ, L., HLASNY, T., BALDO, M., CANTARELLO, E., SHEDDEN, A., BAUMBACH, L., REINEKING, B., OSTROGOVIC, M., VULETIC, D., MAKELA, A., HOLDER, J., BREDAHL JACOBSEN, J., NABUURS, GJ., 2024. Deliverable 4.8. Draft report on regional cases outcomes on ways to enhance forest resilience. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, Wageningen University & Research. SCHMID, B., KUNTTU, J., LUDVIG, A., ROIS, M., TOPPINEN, A., 2024. Deliverable 5.3. Integrated assessment of resilience across forest systems and forest-wood value chains. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, UH and BOKU (EFI coordinator). SENF, C.; SEIDL, R.; 2018. Natural disturbances are spatially diverse but temporally synchronized across temperate forest landscapes in Europe. *Global Change Biology*, 24(3), 1201–1211. <https://doi.org/10.1111/gcb.13897> SENF, C.; SEIDL, R.; 2021. Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability*, 4(1), 63–70. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00609-y> SENF, C., SEIDL, R. 2022a. Deliverable 2.1. Online map of hotspots of disturbance at the continental scale. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, Technical University of Munich. SENF, C., SEIDL, R. 2022b. Deliverable 2.2. Europe’s forest disturbance regimes. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574, Technical University of Munich. WILLIG, J., BAUHUS, J. 2023. Deliverable 2.4. Report on the potential management options to mitigate disturbances. Horizon 2020 project RESONATE, project no. 101000574. WILLIG, J.; SCHWARZ, J.; COMEAU, P.; HARTMANN, H.; KOHNLE, U.; ESPELTA, J. M.; MÄKINEN, H.; OGAYA, R.; PELTONIEMI, M.; PENUELAS, J.; ROTH, B.; RUIZ-PEINADO, R.; RUGE, F.; BAUHUS, J.; 2025. No increased drought-related mortality after thinning: a meta-analysis. *Annals of Forest Science*, 82(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s13595-025-01278-7> *Tabla 1. Casos de estudio del proyecto RESONATE y los retos que se han abordado en*



cada uno de ellos.

Región	Descripción	Reto de resiliencia abordado
Cataluña (España)	Bosques mediterráneos con especies como <i>Pinus halepensis</i> y <i>Quercus ilex</i> , enfrentando estrés hídrico.	Adaptación a sequías prolongadas y aumento de vulnerabilidad climática.
Galicia (España)	Pequeñas propiedades fragmentadas dominadas por <i>Pinus pinaster</i> con alta exposición a incendios.	Prevención de incendios forestales y conservación de biodiversidad en un contexto de propiedad fragmentada.
Bauges (Francia)	Bosques montañosos mixtos (haya-abeto) con accesibilidad limitada para la gestión forestal.	Adaptación a temperaturas más altas que favorecen especies de rápido crecimiento.
Istria (Croacia)	Bosques mediterráneos con roble y pino, afectados por sequías cada vez más frecuentes.	Mitigación de los efectos de la sequía en especies locales como los robles.
New Forest (Reino Unido)	Parque nacional con hábitats forestales y abiertos, gestionados parcialmente bajo Natura 2000.	Equilibrar conservación de hábitats con demandas sociales de recreación y turismo.
Valle del Rin Superior (Alemania)	Bosques manejados por clases de edad con mezcla de especies como robles, alisos y coníferas.	Adaptación a eventos de viento y brotes de plagas cada vez más intensos.
Kostelec (República Checa)	Bosques dominados por <i>Picea abies</i> y <i>Pinus sylvestris</i> afectados por brotes de escarabajos y sequías.	Mitigación de brotes de plagas y adaptación a sequías en bosques gestionados históricamente.
Sur de Finlandia (Finlandia)	Bosques boreales con coníferas manejados productivamente, afectados por tormentas de viento.	Recuperación tras tormentas de viento y mantenimiento de la productividad forestal.

Tabla 2. Principales conflictos identificadas en la bibliografía, retos de la resiliencia (según la definición de RESONATE), diferentes perspectivas y posibles sinergias

Sección CICES	Principales desafíos de resiliencia (según la definición de RESONATE)	Posibles conflictos	Perspectivas divergentes	Medidas sinérgicas posibles / Acciones sinérgicas para minimizar los conflictos	Principales referencias
Regulación y mantenimiento	Abordar los cambios en la demanda social	<ol style="list-style-type: none"> almacenamiento de carbono (en bosques) almacenamiento de carbono en productos de madera cosechada/uso de madera 	<p>Debate científico sobre:</p> <ol style="list-style-type: none"> ¿Es mejor almacenar CO2 en los bosques (biomasa viva, suelos forestales) o debería ser el principal objeto 	Mejora o mantenimiento de las reservas y sumideros de carbono en la gestión forestal activa (<i>Closer to nature/Climate-smart forestry</i>).	<p>EC, 2021 (<i>New EU Forest Strategy 2030</i>)</p> <p>Larsson, B. et al. 2022</p> <p>Seidl et al., 2007, doi: 10.1016/j.foreco.2007.02.035</p> <p>Richards and Stokes, 2004, doi: 10.1023/B:CLIM.000018503.10080.89</p> <p>Chen et al. 2016</p> <p>Carpentier et al. 2017</p>



		a.	<p>vo de la gestión forestal al máximo de extracción sostenible para almacenar carbono en productos de madera aprovechada?</p> <p>El período de tiempo considerado es decisivo para ambas preguntas: ¿Obtenemos más beneficios climáticos a) dejando la biomasa en los bosques o b) usándola en productos y para la generación de energía?</p>		
Regulación y mantenimiento y Provisión	Abordar la pérdida de biodiversidad y los cambios en la demanda social	c) biodiversidad (Protección de la naturaleza) y d) bioeconomía (gestión forestal).	<p>a) la corta genera impactos negativos para la biodiversidad</p> <p>vs.</p> <p>b) la corta y el uso sostenible de los recursos naturales son necesarios para la bioeconomía circular.</p>	<p>Hacer comprender que la gestión forestal sostenible no solo es compatible con la conservación de la naturaleza, sino que puede constituir una herramienta clave para preservar la biodiversidad y al mismo tiempo fomentar una bioeconomía basada en el uso responsable de los recursos forestales. P. ej. (i) Introducción de silvicultura cercana a la naturaleza con, por ejemplo, bosques mixtos y silvicultura de cobertura continua, aplicando innovaciones en métodos de utilización de madera o aumentando la tasa de reutilización y reciclaje para aliviar la presión sobre los recursos vírgenes (uso en cascada de la</p>	<p><i>EC, 2021 (New EU Forest Strategy 2030)</i></p> <p><i>Larsson, B. et al. 2022 (Closer-to-nature forestry)</i></p> <p><i>Bastos Lima, et al. 2022</i></p> <p><i>Ludvig et al., 2019, doi : 10.3390/f10100878</i></p> <p><i>Ledermann et al. 2021</i></p>



				madera). (ii) Segregación: áreas forestales para producción de madera y áreas forestales para protección de la naturaleza.	
Regulación y mantenimiento Y Provisión	Abordar los cambios en la demanda social	a) Incrementar la protección y b) incrementar el uso de madera (consumo).	El Pacto Verde Europeo solicita a) un 10 a 30 % del área forestal bajo protección, mientras que también b) solicita aumentar la utilización de recursos renovables, es decir, madera. Por lo tanto, para aumentar el consumo de productos de madera sería necesario aumentar las importaciones de recursos madereros de fuera de los países de la UE. Amenaza de fuga de carbono	Importaciones solo de países donde se garantice que los recursos madereros provienen de bosques gestionados de manera sostenible (EU-TR).	<i>The Green Deal (EC, 2019), Sinabell and Streicher 2021, Rüter et al. 2016</i>
Provisión	Abordar los cambios en la demanda social	a) Provisión de madera y b) demanda de actividades recreativas.	a) El principal beneficio económico de un bosque es la producción de madera desde la perspectiva de muchos propietarios forestales vs. b) demanda (social) de beneficios recreativos (como senderismo, ocio y actividades deportivas, por ejemplo, ciclismo de montaña).	Diversificación de los objetivos de gestión forestal e introducción de zonas recreativas, junto con mecanismos como los pagos por servicios ecosistémicos, clave para reconocer y sostener los beneficios ambientales que los propietarios forestales generan, especialmente en contextos donde la rentabilidad del aprovechamiento maderero es baja o inexistente	<i>Wilkes-Allemann et al., 2022, doi: 10.1016/j.forpol.2021.102683 Harshaw and Sheppard. 2003: Assessing timber harvesting impacts to recreation in areas adjacent to parks and protected areas. https://www.researchgate.net/publication/266331669_ASSESSING_TIMBER.</i>
Provisión	Abordar los cambios en la demanda social	a) Protección de la naturaleza y b) actividades recreativas.	a) La protección forestal (por ejemplo, en áreas protegidas) está en oposición a (no puede ser obstaculizada por) b) actividades recreativas (como senderismo, ocio y actividades deportivas, por ejemplo, ciclismo de montaña).	El acuerdo sobre zonas recreativas minimiza posibles conflictos.	<i>Vejre et al. 2010 Wilkes-Allemann et al., 2022, doi: 10.1016/j.forpol.2021.102683</i>

Resume la bibliografía respectiva y conecta las compensaciones con la sección de clasificación de servicios ecosistémicos (CICES) para nuestra evaluación posterior.

Tabla 3. Resultados del análisis de escenarios de futuras perturbaciones para la

escala temporal 2021-2100 a partir del mapa virtual

Escenario Climático	Cambio en el Área Perturbada Total (2021-2100)	Incremento por Agente de Perturbación
RCP8.5	+64% (+112% respecto a datos históricos)	- Incendios: +94% (+149% históricos) - Viento: +2% (+18% históricos) - Escarabajos: +54% (+119% históricos)
RCP4.5	+23% (+48% respecto a datos históricos)	- Incendios: +39% (+60% históricos) - Viento: +2% (+18% históricos) - Escarabajos: +2% (+41% históricos)
RCP2.6	-7% (+18% respecto a datos históricos)	- Incendios: -7% (+14% históricos) - Viento: +2% (+16% históricos) - Escarabajos: -20% (+14% históricos)

Figuras

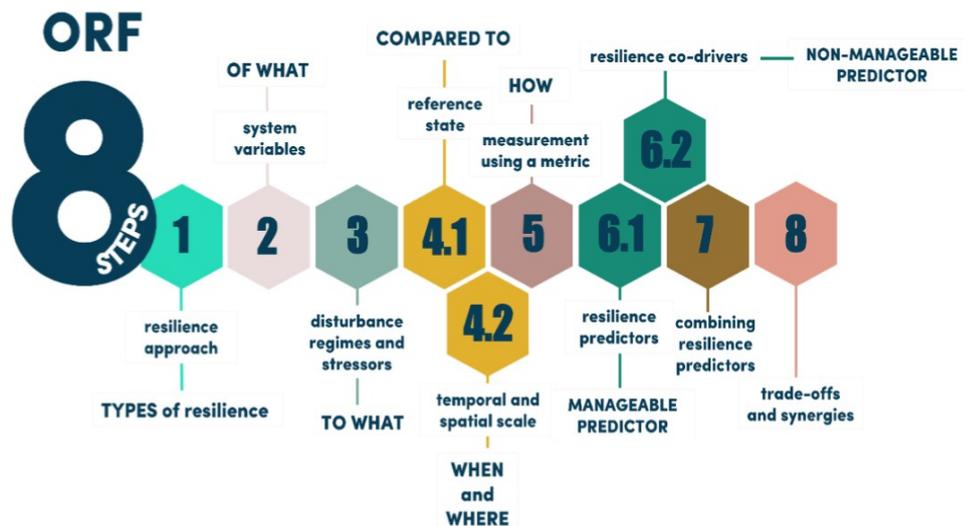


Figura 1. El marco de resiliencia operacional (ORF) consta de ocho pasos principales en su ejecución (fuente: DOI 10.1007/s11625-024-01518-1).



Figura 2. Escalera de demanda de la resiliencia

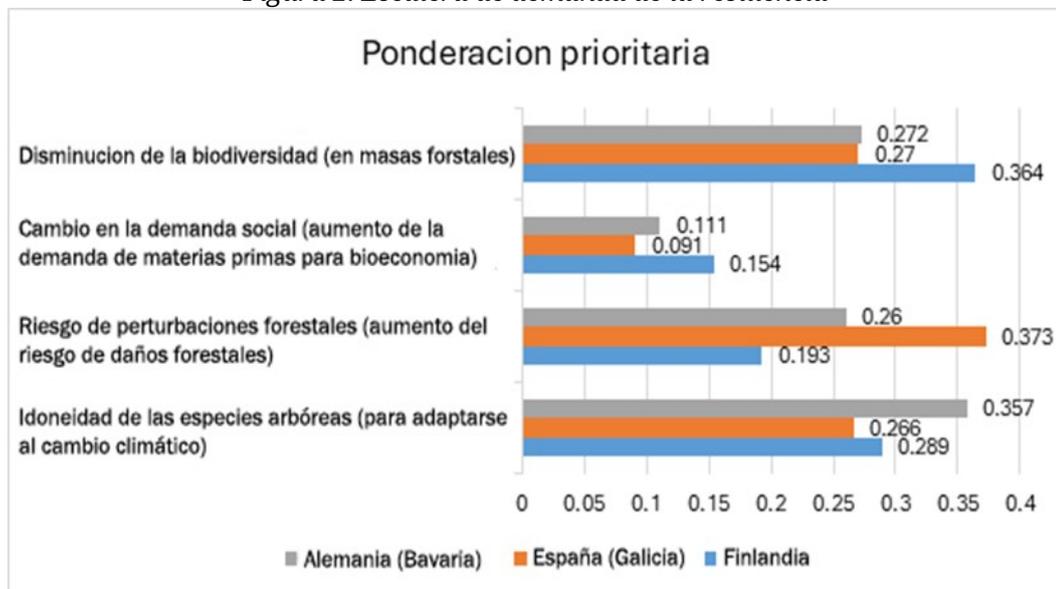


Figura 3. Ponderación prioritaria de los retos de resiliencia, incluidas las respuestas de todos los participantes en cada país objeto de estudio