Bio+A Málaga cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU

MEMORIA DE EJECUCIÓN TÉCNICA

A6 Innovación y Transferencia.

BIO+A MÁLAGA. GESTIÓN FORESTAL SOSTENIBLE, FOMENTANDO LA BIODIVERSIDAD, PROTECCIÓN DE LOS ECOSISTEMAS Y EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA EN LA PROVINCIA DE MÁLAGA

ACCIÓN 6.2. DESARROLLO DE MODELOS DE SELVICULTURA ADAPTATIVA

ACCIÓN 6.2. DESARROLLO DE MODELOS DE SELVICULTURA ADAPTATIVA: DENTRO DE LAS ACTIVIDADES DE INNOVACIÓN LA UCO DESARROLLARÁ MODELOS DE SELVICULTURA ADAPTATIVA QUE PERMITAN GARANTIZAR LA SOSTENIBILIDAD DE LAS MASAS FORESTALES DEL PN SIERRA DE LAS NIEVES Y SU ADAPTACIÓN A LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO. BASADOS EN LOS DATOS OFRECIDOS POR LA ACCIÓN A2 Y EN TÉCNICAS DE BIGDATA Y APLICACIÓN DE MODELOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL SE DESARROLLARÁN ESTOS NUEVOS MODELOS SELVÍCOLAS Y SERÁN TRANSFERIDOS A LAS INSTITUCIONES IMPLICADAS EN LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS FORESTALES EN EL PN DE SIERRA DE LAS NIEVES EN EL MARCO DE LA ACTIVIDAD 4 DE LA A2.

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

BIO+A MÁLAGA. GESTIÓN FORESTAL SOSTENIBLE, FOMENTANDO LA BIODIVERSIDAD, PROTECCIÓN DE LOS ECOSISTEMAS Y EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA EN LA PROVINCIA DE MÁLAGA

Dirección científica:

Rafael Mª Navarro Cerrillo y Guillermo Palacios Rodríguez

Departamento de Ingeniería Forestal, Laboratorio de Dendrocronología, Selvicultura y Cambio Climático, DendrodatLab-ERSAF (RNM 360), Universidad de Córdoba.

Autores:

Navarro-Cerrillo, RM; Varo-Martínez, M.A.; Baietto, A.; Rivas-Cobo, C.A.; Palacios-Rodríguez, G. (2025).

Colaboradores:

TRAGSA: Marta Ruiz Villén y Cristóbal Gaspar Becerra Lopez

Parque Nacional Sierra de las Nieves: Adriano Vázquez Mora, Natalia Ríos Gil, Fernando Ríos y resto del personal del Espacio Natural Protegido de Sierra de las Nieves.

Fotografías y Figuras:

Varo Martínez, MA, Navarro Cerrillo, RM; Andrés Baietto, Guillermo Palacios (salvo que se indique en el texto).

Desarrollo de modelos de selvicultura adaptativa. BIO+ A Málaga © 2025 by Navarro Cerrillo, Varo Martínez, Baietto, Rivas Cobo and Palacios Rodríguez is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Índice

Acción 6.2. Desarrollo de modelos de selvicultura adaptativa 7

1. Introducción 7

2. Selvicultura adaptativa 7

3. Modelización de riesgos 11

4. Definición de los escenarios selvícolas y climáticos 14

4.1. Escenarios selvícolas 14

5. magnitud del riesgo de los sistemas forestales de la comarca de Sª de las Nieves 15

5.1. Magnitud del riesgo 15

5.2. Escenarios selvícolas 19

5.3. Áreas prioritarias de actuación selvícola 19

6. Consideraciones metodológicas de la Acción 6.2. 24

Índice de tablas

Tabla 1: Magnitud del riesgo, la amenaza, la susceptibilidad y la capacidad adaptativa de los tipos de vegetación dominantes en el Parque Nacional y Natural de Sierra de las Nieves. Las letras en negrita indican los valores máximos para cada tipo de vegetación. 16

Tabla 2: Magnitud del riesgo para los bosques de coníferas en el Parque Nacional y Natural de Sierra de las Nieves bajo tres escenarios de gestión forestal: baja intervención, silvicultura tradicional y reducción de la vulnerabilidad climática. 21

Tabla 3: Magnitud del riesgo para los bosques del Parque Nacional y Natural de Sierra de las Nieves bajo diferentes escenarios climáticos 21

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de respuestas adaptativas en un contexto de cambio climático 7

Figura 2: Esquema metodológico de Selvicultura adaptativa en un contexto de cambio climático en la Comarca de Sª de las Nieves..... 10

Figura 3: Modelización de los riesgos según la metodología propuesta por Lecina-Diaz et al para evaluar la susceptibilidad de los bosques de la Comarca de Sª de las Nieves y la influencia de la selvicultura adaptativa. 13

Figura 4:Magnitud del riesgo en el Parque Nacional y Natural de Sierra de las Nieves según escenarios de gestión forestal («baja intervención/sin intervención», «silvicultura tradicional» con intensidades de aclareo de ~30% del área basal; y «reducción de la vulnerabilidad climática» con aclareo intenso de ~50% del área basal). 19

Figura 5: Distribución espacial de los valores de riesgo en la zona de protección periférica del Parque Nacional y Natural de la Sierra de las Nieves. Se destaca la ampliación de una región según los escenarios de gestión forestal (Sin intervención, régimen de aclareo con silvicultura tradicional con intensidades de ~30 % del área basal; y aclareo intenso con reducción del ~50 % del área basal) 22

Figura 6: Distribución espacial de los valores de riesgo en la zona de protección periférica del Parque Nacional y Natural de la Sierra de las Nieves, teniendo en cuenta el escenario climático más desfavorable (SSP585) para el año 2060. Se destaca la ampliación de una región según los escenarios de gestión forestal (Sin intervención, régimen de aclareo con silvicultura tradicional con intensidades de ~30 % del área basal; y aclareo intenso con reducción del ~50 % del área basal)..... 23

Acción 6.2. Desarrollo de modelos de selvicultura adaptativa

1. Introducción

La comarca de Sierra de las Nieves, enclave natural de gran valor ecológico y forestal en la provincia de Málaga, es un espacio de referencia para la gestión sostenible del monte mediterráneo. Con una elevada diversidad de especies forestales, entre ellas el emblemático *Abies pinsapo*, y sometida a fuertes presiones climáticas y sociales, esta comarca requiere de herramientas avanzadas para planificar sus recursos forestales de forma eficiente, sostenible y resiliente.

En este marco, la Acción 6.2. se orienta a identificar los riesgos futuros para los ecosistemas forestales de la comarca de Sª de las Nieves en un contexto de cambio climático y en escenarios de futuro. Es, por tanto, esencial adecuar la silvicultura a los riesgos de perturbaciones (ej., fuego, plagas y enfermedades y eventos climáticos extremos) para poder ejecutar los tratamientos selvícolas más adecuados.

2. Selvicultura adaptativa

La selvicultura adaptativa busca adaptar los bosques a las nuevas condiciones ambientales determinadas por los cambios climáticos futuros o, específicamente, mejorar la resiliencia forestal ante los regímenes de perturbación cambiantes[1]. Esto ha llevado al desarrollo de conceptos como selvicultura adaptativa reactiva versus proactiva o anticipación y mitigación de riesgos en oposición a promoción de resiliencia forestal[2]. Estos términos corresponden a los extremos de un continuo que va desde sistemas forestales en equilibrio hasta la presencia de impactos muy severos, como muerte regresiva y mortalidad de árboles en cientos de hectáreas[3]. Esto requiere adoptar diferentes estrategias silvícolas, dependiendo tanto de la magnitud de los impactos esperados como de los cambios en la estructura y funcionamiento del bosque (Fig. 1).

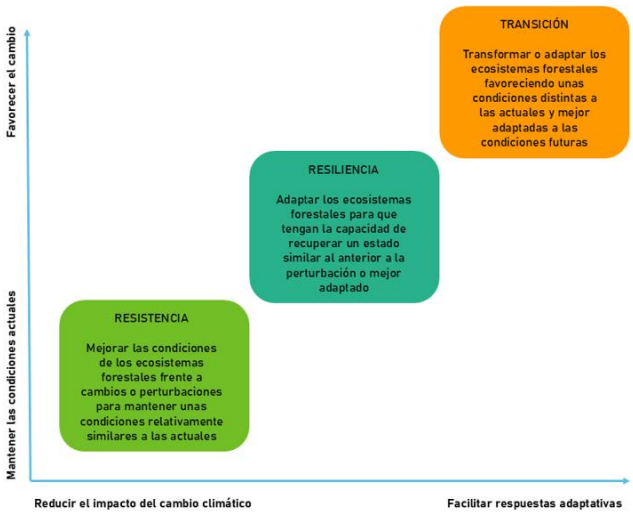


Figura 1: Esquema de respuestas adaptativas en un contexto de cambio climático

La selvicultura, por tanto, necesita basarse en una serie de nuevos criterios, que deben estar relacionados con las respuestas de los bosques a los cambios recientes y probables. En este sentido, los dispostivos

[1]Seidl, R.; Spies, T. A.; Peterson, D. L.; Stephens, S. L.; Hicke, J. A. Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services. Journal of Applied Ecology 2016, 53, 120-129.
[2]Lindner, M.; Fitzgerald, J. B.; Zimmermann, N. E.; Reyer, C.; Delzon, S.; van der Maaten, E.;Suckow, F. Climate change and European forests: what do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest manage-ment? Journal of environmental management 2014, 146, 69-83.
[3]Navarro Cerrillo, R. M. (2024) Decaimiento en bosques mediterráneos: desentrañando amenazas y abordando retos para su gestión y conservación. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 51(1): 21-48.

selvícolas experimentales proporcionan datos a largo plazo que son esenciales para un diagnóstico correcto al abordar el problema de la gestión de ecosistemas forestales en un contexto de cambio climático[4,5,6].

Este aumento de la frecuencia, la duración y la gravedad de las perturbaciones puede alterar la composición y la estructura de los ecosistemas forestales de Sª de las Nieves, lo que representa una amenaza no sólo para los servicios ecosistémicos, sino también para la supervivencia de los bosques. Para predecir con precisión los futuros riesgos climáticos para los ecosistemas forestales de la comarca de Sª de las Nieves es necesario profundizar en nuestra comprensión de la dinámica de las potenciales perturbaciones y las interacciones entre los agentes de perturbación.

Lo anterior hay que relacionarlo con la gestión forestal adaptativa más adecuada (Acción 2.4 y 2.5), ya que éste tiene el potencial de ajustar el estado de los ecosistemas a futuros regímenes de perturbación al reducir su susceptibilidad y, por lo tanto, aumentar su capacidad de adaptación. Estudios recientes han evaluado cómo diferentes estrategias de gestión forestal influyen en la provisión de servicios ecosistémicos7, mitigan el riesgo de incendios forestales y minimizan la mortalidad derivada de sequías8 y plagas. Sin embargo, aún existen lagunas en los estudios que evalúan la vulnerabilidad de diferentes enfoques de gestión ante perturbaciones importantes.

Las perturbaciones, tanto bióticas (p. ej., plagas y enfermedades) como abióticas (p. ej., incendios y eventos climáticos extremos) son componentes intrínsecos de la dinámica actual de los ecosistemas forestales de Andalucía[9], pudiendo alterar la estructura, la composición y distribución de los bosques. Si bien históricamente las perturbaciones han contribuido a modelar la diversidad de los ecosistemas y la heterogeneidad del paisaje en Sierra de las Nieves[10], cada vez hay más evidencia que sugiere que el cambio climático está modificando los patrones de perturbación. Los daños relacionados con plagas y enfermedades derivados del clima son cada vez más frecuentes y graves, lo que provoca una mortalidad generalizada de árboles y un cambio significativo de los sumideros de carbono a fuentes de carbono en las regiones forestales afectadas[11].

[4] Vilà-Cabrera, A.; Coll, L.; Martínez-Vilalta, J.; Retana, J. Forest management for adaptation to climate change in the Medi-terranean basin: A synthesis of evidence. Forest Ecology and Management 2018, 407, 16-22.

[5] Pretzsch, H.; del Río, M.; Biber, P.; Arcangeli, C.; Bielak, K.; Brang, P.; ... & Sycheva, E. Maintenance of long-term experi-ments for unique insights into forest growth dynamics and trends: review and perspectives. European Journal of Forest Research 2019, 138(1), 165-185.

[6] Ruiz-Benito, P.; Vacchiano, G.; Lines, E. R.; Reyer, C. P.; Ratcliffe, S.; Morin, X.; ... & Zavala, M. A. Available and missing data to model impact of climate change on European forests. Ecological Modelling 2020, 416, 108870.

[7] Morán-Ordóñez, A., Ameztegui, A., De Cáceres, M., De-Miguel, S., Lefèvre, 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.

[8] del Campo, A.D., González-Sanchis, M., Molina, A.J., García-Prats, A., Ceacero, C.J., Bautista, I., 2019. Effectiveness of water-oriented thinning in two semiarid forests: The redistribution of increased net rainfall into soil water, drainage and runoff. Forest Ecol. Manag. 438, 163-175.

[9] Cano-Manuel León, J., Aspizua Cantón, R., Barea-Azcón, J. M., Bonet García, F. J., Cabello Piñar, J., Corzo Toscano, M., ... & Navarro Cerrillo, R. (2024). Gestión adaptativa de los pinares mediterráneos andaluces frente al cambio global.

[10] Zotano, J. G., Martínez, R. P., Cobo, J. A. O., & Martín, J. M. (2023). " Abies pinsapo" e incendios forestales: una larga historia de supervivencia a eventos extremos en Sierra Bermeja (Sistema Bético). In Geografía: cambios, retos y adaptación: libro de actas. XVIII Congreso de la Asociación Española de Geografía, Logroño, 12 al 14 de septiembre de 2023 (pp. 127-136). Asociación Española de Geografía.

[11] Navarro-Cerrillo, R. M., González-Moreno, P., Ruiz-Gómez, F. J., Sánchez-Cuesta, R., Gazol, A., & Camarero, J. J. (2022). Drought stress and pests increase defoliation and mortality rates in vulnerable Abies pinsapo forests. Forest Ecology and Management, 504, 119824.

La Acción 6.2. se ha centrado en integrar la planificación y el modelado de los tipos de sistemas forestales dominantes en la comarca de Sª de las Nieves (Acción 2.1. y Acción 2.2.) para diseñar la selvicultura para reducir su vulnerabilidad ante las perturbaciones más importantes (Fig. 2).

En la Acción 6.2. se integran los datos armonizados en la Acción 2.1 y la Acción 2.2. (ej., inventarios forestales, índice de riesgo de incendios forestales) e información climática y de plagas de alta resolución en las proyecciones climáticas para evaluar los riesgos sensibles al clima asociados con perturbaciones abióticas y bióticas clave (p. ej., incendios, sequías y plagas) en los ecosistemas forestales de la comarca de Sª de las Nieves, considerando diversos enfoques de gestión forestal y escenarios climáticos.

Los resultados específicos de esta acción han sido:

i) Definir la magnitud del riesgo, la susceptibilidad forestal y la capacidad adaptativa (sensu Lecina-Diaz et al.[12]) de los principales ecosistemas forestales de la comarca;

ii) Simular los riesgos en diferentes condiciones climáticas.

iii) Modelar escenarios de gestión selvícola que optimicen los servicios ambientes (p. ej., el carbono) y en particular la biomasa en los montes públicos de Sierra de las Nieves.

iv) Identificar las áreas críticas de riesgo para recomendar estrategias de gestión forestal en el Parque Nacional y Natural de Sª de las Nieves, y en sus áreas limítrofes para recomendar actuaciones de selvicultura adaptativa ante el cambio climático.

[12] Lecina-Diaz, J., Martínez-Vilalta, J., Alvarez, A., Banqué, M., Birkmann, J., Feldmeyer, D., Retana, J., 2021a. Characterizing Forest vulnerability and risk to climate-change hazards. Front. Ecol. Environ. 19(2), 126-133.

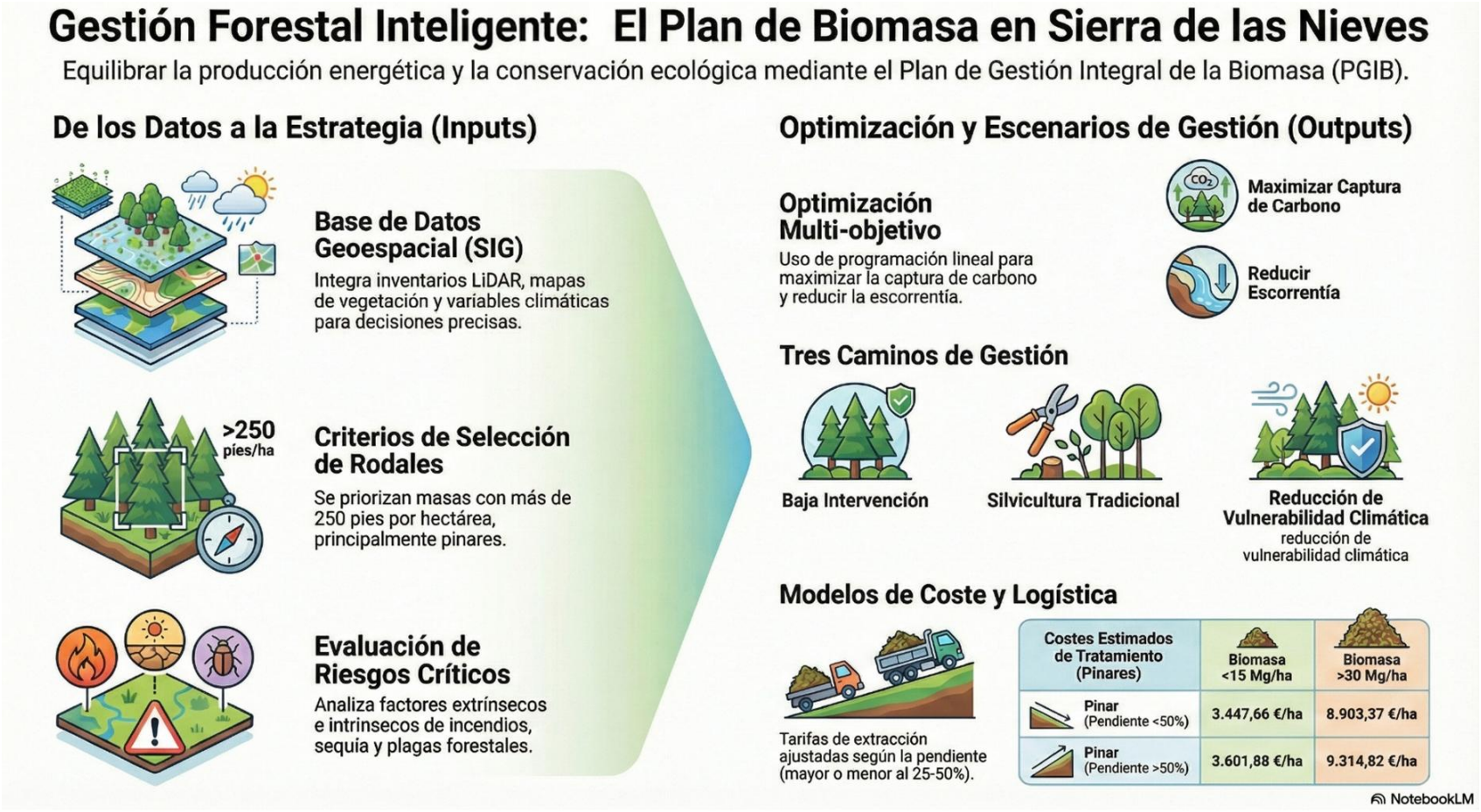


Figura 2: Esquema metodológico de Selvicultura adaptativa en un contexto de cambio climático en la Comarca de Sª de las Nieves.

3. MODELIZACIÓN DE RIESGOS

La modelización de los riesgos se ha realizado siguiendo la metrología propuesta por Lecina-Diaz et al.[13] para evaluar la susceptibilidad de los bosques a los riesgos.

Esta metodología se basa en la variabilidad del valor inherente de los Servicios Ecosistémicos (SE), la magnitud del riesgo y la distribución de probabilidad (Fig. 3). Los riesgos asociados a las diferentes perturbaciones se evalúan mediante diversos atributos de los ecosistemas forestales, que modulan los impactos inmediatos sobre la estructura del bosque y su nivel de susceptibilidad.

Tras la perturbación, los ecosistemas tienen el potencial de recuperarse mediante diversas estrategias, definiendo así su capacidad adaptativa.

Por lo tanto, el concepto de riesgo se operacionaliza de la siguiente manera[14]:

$$Riesgo = E \cdot HM^{S} \cdot LAC$$

Donde E representa el servicio ambiental seleccionado (en este caso la biomasa), HM la magnitud del peligro, S la susceptibilidad y LAC la capacidad adaptativa.

En el proyecto Bio+A Málaga «E» se refiere a la biomasa (secuestro de carbono) susceptible a los impactos negativos de las perturbaciones; HM se refiere a la distribución de probabilidad de las tres amenazas principales (es decir, incendios, plagas y sequías) sobre los ecosistemas de los montes de la comarca de Sª de las Nieves[15] y se complementa con variables suplementarias (como se detalla en la Fig. 3). «S» denota la predisposición de un ecosistema a responder a una perturbación, en función de los atributos que influyen en el impacto inmediato de la amenaza seleccionada. Por último, LAC se refiere a la capacidad de adaptación de cada ecosistema. E y HM se relacionan con las condiciones existentes antes de la perturbación, mientras que S se relaciona con las circunstancias durante la perturbación, y LAC se relaciona con el estado del bosque tras la perturbación (selvicultura adaptativa, Fig. 3).

Valores Expuestos (E): El indicador considerado en esta categoría es la absorción de carbono por los bosques, calculada como la diferencia en las reservas de carbono (derivadas de la biomasa aérea de árboles y arbustos mediante ecuaciones alométricas específicas para cada especie; Montero et al., (2005)[16] entre el IFN2 y el IFN3 (1986-2007), expresada en toneladas por hectárea por año (Mg ha^{-1} $año^{-1}$).

Magnitud del Peligro (HM): Se calcularon índices de peligro relevantes relacionados con la ocurrencia de incendios (Índice de Riesgo de Incendios), sequías (Índice de Aridez) y plagas y enfermedades (Pesca de Plagas y Enfermedades), así como otros factores que modifican la HM al afectar los índices mencionados,

[13] Lecina-Diaz *et. al* (2021) Op cite
[14] Lecina-Diaz *et. al* (2021) Op cite
[15] Lecina-Diaz *et. al* (2021) Op cite
[16] Montero, G., Ruiz-Peinado, R., & Munoz, M. (2011). Producción de biomasa y fijación de CO_2 por los bosques españoles.

como la continuidad forestal, la distancia a las carreteras y la densidad poblacional (Fig. 3).

Susceptibilidad (S): La vulnerabilidad de los ecosistemas a las perturbaciones se determina mediante una combinación de factores intrínsecos y extrínsecos. Se calcularon los siguientes factores intrínsecos que afectan a cada tipo de perturbación: incendios (continuidad vertical del bosque, carga de combustible e inflamabilidad), sequía (características hidráulicas y profundidad de enraizamiento) y brotes de plagas y enfermedades (Índice de Área Foliar). Los factores extrínsecos corresponden a la capacidad de los bomberos para extinguir incendios (Índice de Dificultad de Supresión).

Capacidad Adaptativa (CAF): La capacidad adaptativa se calcula de forma similar mediante una combinación de elementos intrínsecos y extrínsecos. Los factores intrínsecos abarcan principalmente factores relacionados con las características funcionales de las especies, es decir, aquellos que determinan la respuesta de las especies vegetales a factores ambientales y perturbaciones[17]. Se seleccionaron rasgos funcionales relacionados con las características de regeneración de las especies (capacidad de rebrote y capacidad de siembra) que determinan la recuperación forestal[18]. Los factores extrínsecos incluyen características externas que afectan la recuperación de las especies tras perturbaciones (evapotranspiración, radiación solar, pendiente y gestión forestal).

[17] Pausas, J.G., Bradstock, R.A., Keith, D.A., Keeley, J.E., 2004. Plant functional traits in relation to fire in crown-fire ecosystems. Ecology 85 (4), 1085–1100.

[18] Lecina-Diaz, J., Martínez-Vilalta, J., Alvarez, A., Banqu´e, M., Birkmann, J., Feldmeyer, D., Retana, J., 2021a. Characterizing forest vulnerability and risk to climate-change hazards. Front. Ecol. Environ. 19 (2), 126–133



Figura 3: Modelización de los riesgos según la metodología propuesta por Lecina-Diaz et al (2014)[19] para evaluar la susceptibilidad de los bosques de la Comarca de Sª de las Nieves y la influencia de la selvicultura adaptativa.

[19] Lecina-Diaz *et. al* (2021) Op cite

4. DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS SELVÍCOLAS Y CLIMÁTICOS

4.1. Escenarios selvícolas

Se han considerado tres escenarios selvícolas acordes con los Proyectos de ordenación de montes existentes en la comarca, detallando la edad de cada intervención, el tipo - regeneración, corta de mejora - y el peso de cada una[20].

- El primer escenario, denominado "baja intervención", prevé rotaciones cortas (80 años) y acciones de claras "ocasionales", promoviendo el uso de madera como biomasa.
- El segundo escenario, denominado "silvicultura tradicional", busca la promoción de productos duraderos y útiles (madera estructural, muebles), lo que implica extender las rotaciones a más de 100 años e implementar una intensidad de régimen de aclareo selectivo (~30% del área basal).
- El tercer escenario, "reducción de la vulnerabilidad climática", busca mejorar la adaptación de los bosques a la escasez de agua futura esperada mediante aclareos tempranos e intensos (~50% del área basal).

Estos escenarios son acordes con la importancia de las masas artificiales en la comarca de Sª de las Nieves. En estos tipos de masas, uno de los objetivos principales de la gestión en la transformación hacia masas mixtas, con estructuras irregulares, que contribuirían una silvicultura climáticamente inteligente más adecuada a la mitigación y adaptación al cambio global[21,22]. Por lo tanto, aplicamos los tres escenarios de gestión forestal únicamente a rodales compuestos por plantaciones de pino.

La superficie cubierta por este tipo de formaciones en cada espacio natural se ha revisado en la Acción 2.1., en particular a partir del Sistema de Información sobre el Patrimonio Natural de Andalucía (SIPNA[23]).

4.2. Escenarios climáticos

Se han considerado los escenarios climáticos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6, https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/) para evaluar los cambios proyectados en el clima futuro y su impacto en el servicio ecosistémico evaluado (ej., biomasa).

Con el fin de proporcionar escenarios futuros plausibles para la gestión, seleccionamos dos escenarios SSP (Trayectorias Socioeconómicas Compartidas) contrastantes (es decir, SSP126 y SSP585), y los dos primeros períodos (es decir, 2021-2040, 2041-2060). Utilizamos esta información

[20] Navarro-Cerrillo, R.M., Cachinero-Vivar, A.M., Pérez-Priego, Ó., Cantón, R.A., Begueria, S., Camarero, J.J., 2023. Developing alternatives to adaptive silviculture: Thinning and tree growth resistance to drought in a Pinus species on an elevated gradient in Southern Spain. Forest Ecol. Manag., 537, 120936.

[21] Navarro-Cerrillo, R. M., Guzmán-Álvarez, J. R., Clavero-Rumbao, I., & Ceaceros, C. (2012). Spatial pattern of landscape changes and consequence changes in species diversity between 1956-1999 of *Pinus halepensis* Miller plantations in Montes de Malaga State Park (Andalusia, Spain). Open Journal of Ecology, 2(3), 154-165.

[22] 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. Forest Ecol. Manag., 524, 120526.

[23] https://portalrediam.cica.es/caracterizacion_vegetacion/sipna.html

para calcular las proyecciones futuras de los índices de aridez y riesgo de incendios, que afectan a los componentes HM, y de la evapotranspiración, que afecta a los componentes LAC. No evaluamos las tendencias proyectadas para los demás indicadores relacionados con peligros (por ejemplo, brotes de plagas y enfermedades) para evitar un análisis excesivamente complejo.

5. MAGNITUD DEL RIESGO DE LOS SISTEMAS FORESTALES DE LA COMARCA DE Sª DE LAS NIEVES

5.1. Magnitud del riesgo

La Tabla 1 presenta la magnitud del Riesgo, la Peligrosidad (Hazard Magnitude), la Susceptibilidad y la Capacidad Adaptativa de los principales tipos de vegetación en el Parque Nacional-Natural de Sierra de las Nieves. Estos indicadores permiten comprender cómo distintos tipos de formaciones vegetales responden ante perturbaciones y amenazas, ofreciendo una visión integrada de su vulnerabilidad ecológica.

Tabla 1: Magnitud del riesgo, la amenaza, la susceptibilidad y la capacidad adaptativa de los tipos de vegetación dominantes en el Parque Nacional y Natural de Sierra de las Nieves. Las letras en negrita indican los valores máximos para cada tipo de vegetación.

	Riesgo		Magnitud de las amenazas		Susceptibilidad		Capacidad adaptativa	
Tipo forestal	**Mean (±SD)**	**Máx-Min**	**Mean (±SD)**	**Máx-Min**	**Mean (±SD)**	**Máx-Min**	**Mean (±SD)**	**Máx-Min**
Frondosas	0.154(0.036)	0.269-0.106	0.397(0.088)	0.591-0.226	0.575(0.062)	0.718-0.455	0.698(0.038)	0.790-0.594
Coníferas	**0.168(0.036)**	0.305-0.101	**0.408(0.073**)	0.760-0.231	0.539(0.047)	0.744-0.395	0.699(0.035)	0.831-0.605
Masas mixtas	0.153(0.017)	0.193-0.116	0.405(0.068)	0.537-0.293	**0.601(0.052)**	0.699-0.483	**0.709(0.026)**	0.791-0.650
Matorrales	0.011(0.004)	0.025-0.001	0.365(0.086)	0.758-0.153	0.217(0.016)	0.269-0.138	0.693(0.032)	0.817-0.557

En primer lugar, al analizar el Riesgo, se observa que los bosques de coníferas presentan el valor medio más elevado (0.168 ± 0.036), seguido muy de cerca por los bosques mixtos (0.153 ± 0.017) y los caducifolios (0.154 ± 0.036). En contraste, el matorral muestra un valor marcadamente inferior (0.011 ± 0.004), lo que indica una menor exposición o impacto relativo en términos de riesgo global. Estos resultados sugieren que los sistemas forestales arbolados, especialmente las coníferas, son más sensibles a perturbaciones en comparación con la vegetación arbustiva, que exhibe una notable resistencia o baja exposición.

En cuanto a la Magnitud de la Peligrosidad, nuevamente los bosques de coníferas registran el valor medio más alto (0.408 ± 0.073), evidenciando una mayor probabilidad de sufrir eventos adversos significativos. El resto de las formaciones (caducifolias, mixtas y matorrales) muestran valores similares, aunque siempre por debajo, lo que subraya el carácter particularmente vulnerable de las coníferas frente a amenazas naturales o antrópicas.

La Susceptibilidad refleja un patrón parcialmente distinto. En este caso, el valor máximo corresponde a los bosques mixtos (0.601 ± 0.052), lo que indica que esta combinación de especies puede ser más sensible a los impactos una vez que ocurre un evento adverso. Los caducifolios y las coníferas muestran cifras relativamente similares (0.575 ± 0.062 y 0.539 ± 0.047, respectivamente), mientras que el matorral se sitúa muy por debajo (0.217 ± 0.016). Este comportamiento evidencia que, si bien las coníferas están más expuestas a eventos peligrosos, los bosques mixtos presentan una mayor sensibilidad ecológica a sufrir daños.

Por último, respecto a la Capacidad Adaptativa, las diferencias son menores entre tipos de vegetación, aunque los bosques mixtos vuelven a destacar con el valor más alto (0.709 ± 0.026), seguidos de cerca por los caducifolios (0.698 ± 0.038) y las coníferas (0.699 ± 0.035). El matorral muestra un valor muy similar (0.693 ± 0.032), lo que indica que, en términos de capacidad de respuesta y adaptación, todas las formaciones presentan limitaciones relativamente homogéneas.

En conjunto, estos resultados reflejan que los bosques de coníferas son los más expuestos al riesgo y a la magnitud de la peligrosidad, mientras que los bosques mixtos concentran los valores más altos en susceptibilidad y falta de capacidad adaptativa.

Los matorrales, en cambio, se posicionan como la formación más resistente, con valores consistentemente bajos en riesgo y susceptibilidad. Esto pone de manifiesto la importancia de considerar no solo la exposición a amenazas, sino también la sensibilidad intrínseca y la capacidad de adaptación de cada tipo de vegetación al momento de diseñar estrategias de gestión y conservación en el Parque Nacional Sierra de las Nieves.

El análisis de los diferentes componentes de riesgo para los tres principales peligros considerados (incendios, clima y plagas) ha mostrado la vulnerabilidad del Parque Nacional y del Parque Natural de Sierra de las Nieves frente a estas

perturbaciones, muy particularmente las áreas cubiertas por repoblaciones forestales, aunque los bosques mixtos también han mostrado valores elevados de vulnerabilidad.

Cabe destacar que las formaciones arbustivas exhibieron valores de riesgo muy bajos en las dos áreas protegidas, con una susceptibilidad muy baja, pero con valores de HM y LAC similares a los de los demás tipos de bosque.

Los resultados obtenidos refuerzan la hipótesis del proyecto Bio+A, y facilitan la toma de decisiones selvícolas (Acción 2.4 y 2.5) sobre la base de la gestión del riesgo y de la vulnerabilidad (S y LAC) en el contexto de la gestión forestal. Una consecuencia inmediata es la necesidad de selvicultura de las repoblaciones forestales en la comarca de Sierra de las Nieves (ej., gestión de la biomasa, Acción 2.4.), de forma que disminuyan su vulnerabilidad, ya sea reduciendo su susceptibilidad o mejorando su capacidad de adaptación[24].

En cuanto a la susceptibilidad, los factores internos de los sistemas forestales, como las características estructurales y funcionales, podrían mejorarse a través de la gestión de la biomasa para mitigar la vulnerabilidad forestal. Por ejemplo, la modificación de la continuidad de la vegetación vertical y horizontal en bosques de coníferas mediante claras podría mejorar la resistencia de un bosque a los incendios forestales y al cambio climático[25]. Además, la orientación de la selvicultura orientada a la biomasa permitiría favorecer la evolución de muchos rodales puros de pinar hacia rodales mixtos que albergan diversas especies (p. ej., formaciones de Pinus-Quercus y Pinus-Abies-Quercus) con diversos mecanismos de recuperación (p. ej., rebrote y siembra) puede mejorar la autoorganización del ecosistema y su capacidad de adaptación.

[24] Navarro-Cerrillo, R. M., Cachinero-Vivar, A. M., Pérez-Priego, Ó., Cantón, R. A., Begueria, S., & Camarero, J. J. (2023). Developing alternatives to adaptive silviculture: Thinning and tree growth resistance to drought in a Pinus species on an elevated gradient in Southern Spain. Forest Ecology and Management, 537, 120936.

[25] Aeztegui, A., Morán-Ordóñez, A., Rodrigues, M; De Cáceres, Coll, L. 2022. El papel de la gestión forestal en la vulnerabilidad del bosque mediterráneo frente a sequías, incendios y tormentas. Congreso Forestal Español, SECF

5.2. Escenarios selvícolas

Los tres escenarios de gestión forestal considerados presentaron diferentes valores de riesgo, que disminuyeron con la intensidad de la intervención en la Sierra de las Nieves (Fig. 4, Tabla 2). Los valores de riesgo más bajos se corresponden con el escenario de "reducción de la vulnerabilidad climática".

Asimismo, al considerar los escenarios climáticos, se observó un aumento del riesgo en las dos áreas protegidas (Fig. 5 y 6, Tabla 2). Si bien el aumento en el valor absoluto fue bajo tanto para el escenario optimista como para el pesimista, expresado en porcentaje, el valor aumentó considerablemente para los escenarios más pesimistas en todas las áreas protegidas (6,17%).

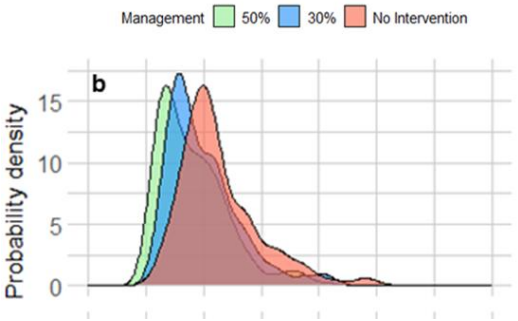


Figura 4:Magnitud del riesgo en el Parque Nacional y Natural de Sierra de las Nieves según escenarios de gestión forestal («baja intervención/sin intervención», «silvicultura tradicional» con intensidades de aclareo de ~30% del área basal; y «reducción de la vulnerabilidad climática» con aclareo intenso de ~50% del área basal)[26].

Los enfoques a largo plazo de la selvicultura pueden implicar la adaptación de la planificación forestal a la gestión del riesgo y la vulnerabilidad con el objetivo de configurar la dinámica futura del riesgo y de la vulnerabilidad[27].

En el proyecto Bio+A, al considerar escenarios de gestión forestal, observamos una reducción significativa de los riesgos. Sin embargo, cuando se consideran los escenarios de cambio climático, encontramos una reducción moderada del riesgo, principalmente debido al breve período considerado (2040-2060), lo que fortalece la importancia de la selvicultura en la reducción de los riesgos relacionados con las perturbaciones.

5.3. Áreas prioritarias de actuación selvícola

La distribución espacial del riesgo, que incluye HM, S y LAC muestra patrones espaciales consistentes según el nivel de riesgo, como se ilustra en la Figura 3. En el Parque Nacional y Natural de Sª de las Nieves muestra que los mayores valores de riesgo se concentraron en las zonas del Parque Natural, lo que coincide con las áreas con mayor presencia de repoblaciones forestales. Por el contrario, las áreas con alta cobertura arbustiva obtuvieron la menor magnitud de riesgo (véase la Tabla 1).

Los mapas asociados a los riesgos han permitido identificar áreas críticas en condiciones extremas, donde pueden ocurrir los eventos de mayor perturbación, coincidiendo con los niveles de riesgo más altos. La Figura 5 incluye algunos ejemplos de áreas críticas en términos de alto riesgo de perturbaciones.

Esto pone en evidencia la urgente necesidad de hacer actuaciones selvícolas en los sistemas forestales del Parque Nacional y del Parque

[26] Navarro-Cerrillo, R. M., & Ariza-Salamanca, A. J. (2024). Uncovering hazards and adaptive capacity: a comprehensive risk assessment study in three conservation areas in Spain. Forest Ecology and Management, 572, 122324.

[27] Ontl, T. A., Janowiak, M. K., Swanston, C. W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., Patch, N., 2020. Forest management for carbon sequestration and climate adaptation. J. For., 118(1), 86-101.

Natural, en particular en las masas procedentes de repoblación, lo que ayudar a mitigar su impacto en un contexto de cambio climático. Este resultado sugiere que las características esenciales de los ecosistemas forestales en estas áreas pueden verse alteradas significativamente, independientemente del cumplimiento de las políticas climáticas.

El conocimiento de la magnitud del riesgo es necesario para tomar decisiones sobre acciones críticas en el Parque Nacional y en el Parque Natural de Sª de las Nieves y anticipar posibles perturbaciones destructivas, incluso considerando las proyecciones climáticas actuales más optimistas[28]. Los resultados de la modelización realizada en el proyecto Bio+A destaca que la gestión forestal puede servir para adaptar estos sistemas forestales contra los impactos de perturbaciones importantes, facilitando transiciones más fluidas a estados estables alternativos. Por otro lado, implica que los bosques de menor biodiversidad, como los pinares dentro de las áreas de amortiguamiento, pueden ser particularmente vulnerables a transiciones críticas en respuesta al cambio climático. Esta susceptibilidad es evidente en los escenarios de gestión forestal y clima (Tabla 2 y 3), y, en consecuencia, subraya la urgencia de implementar medidas de gestión forestal para anticipar los impactos del cambio climático. Además, encontramos que los efectos del cambio climático pueden ser irreversibles a corto plazo en escenarios específicos, con efectos potencialmente duraderos sobre los ecosistemas[29]. Dada la brecha entre los objetivos de las políticas forestales actuales en los parques nacionales, que tienen el objetivo de restringir las intervenciones de gestión forestal, es probable que se produzcan perturbaciones en esas áreas[30].

Los resultados de proyecto Bio+A han permitido localizar las áreas críticas de riesgo, muy particularmente en el Parque Natural de Sª de las Nieves. La distribución esperada de estos puntos críticos podría atribuirse a varios factores. Por ejemplo, la ubicación del Parque Nacional en el área núcleo de distribución del pinsapo.

En definitiva, estos resultados enfatizan la necesidad de una gestión eficaz y subrayan la importancia de la silvicultura adaptativa para conservar no solo las áreas de amortiguamiento que rodean los parques nacionales, sino también los propios parques. El Parque Natural, y los montes circundantes, representan una oportunidad para establecer una red de infraestructuras verdes basada en los puntos críticos de alto riesgo, mejorando así la conectividad entre áreas protegidas. Estudios previos también han señalado la importancia de las áreas protegidas y aquellas con protección no estricta para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos[31]

[28] https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/cambio-climatico-y-clima/escenarios-locales-de-cambio-climatico

[29] Proyecto pinsapo (2020): Elaboración de metodología para el seguimiento y control de los procesos de regeneración del Abies Pinsapo Boiss, en su ámbito de distribución, provincias de Cádiz y Málaga

[30] https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn.html

[31] Lecina-Diaz, J., Alvarez, A., De Cáceres, M., Herrando, S., Vayreda, J., Retana, J., 2019. Are protected areas preserving ecosystem services and biodiversity? Insights from Mediterranean forests and shrublands. Landsc. Ecol., 34, 2307-2321.

Tabla 2: Magnitud del riesgo para los bosques de coníferas en el Parque Nacional y Natural de Sierra de las Nieves bajo tres escenarios de gestión forestal: baja intervención, silvicultura tradicional y reducción de la vulnerabilidad climática.

Baja intervención		**Selvicultura tradicional**		**Selvicultura de reducción de vulnerabilidad climática**	
Mean (±SD)	**Max-Min**	**Mean (±SD)**	**Max-Min**	**Mean (±SD)**	**Max-Min**
0.164±0.04	0.306-0.102	**0.408(0.073**)	**0.760**-0.231	0.539(0.047)	**0.744**-0.395

Tabla 3: Magnitud del riesgo para los bosques del Parque Nacional y Natural de Sierra de las Nieves bajo diferentes escenarios climáticos

	Escenario	**Mean ±sd**	**Max**	**Min**
2021	No intervención	0.162±0.030	0.305	0.102
2040	Ssp126	0.165±0.031	0.308	0.107
	Ssp585	0.170±0.031	0.314	0.112
2060	Ssp126	0.166±0.031	0.310	0.108
	Ssp585	0.172±0.031	0.317	0.113

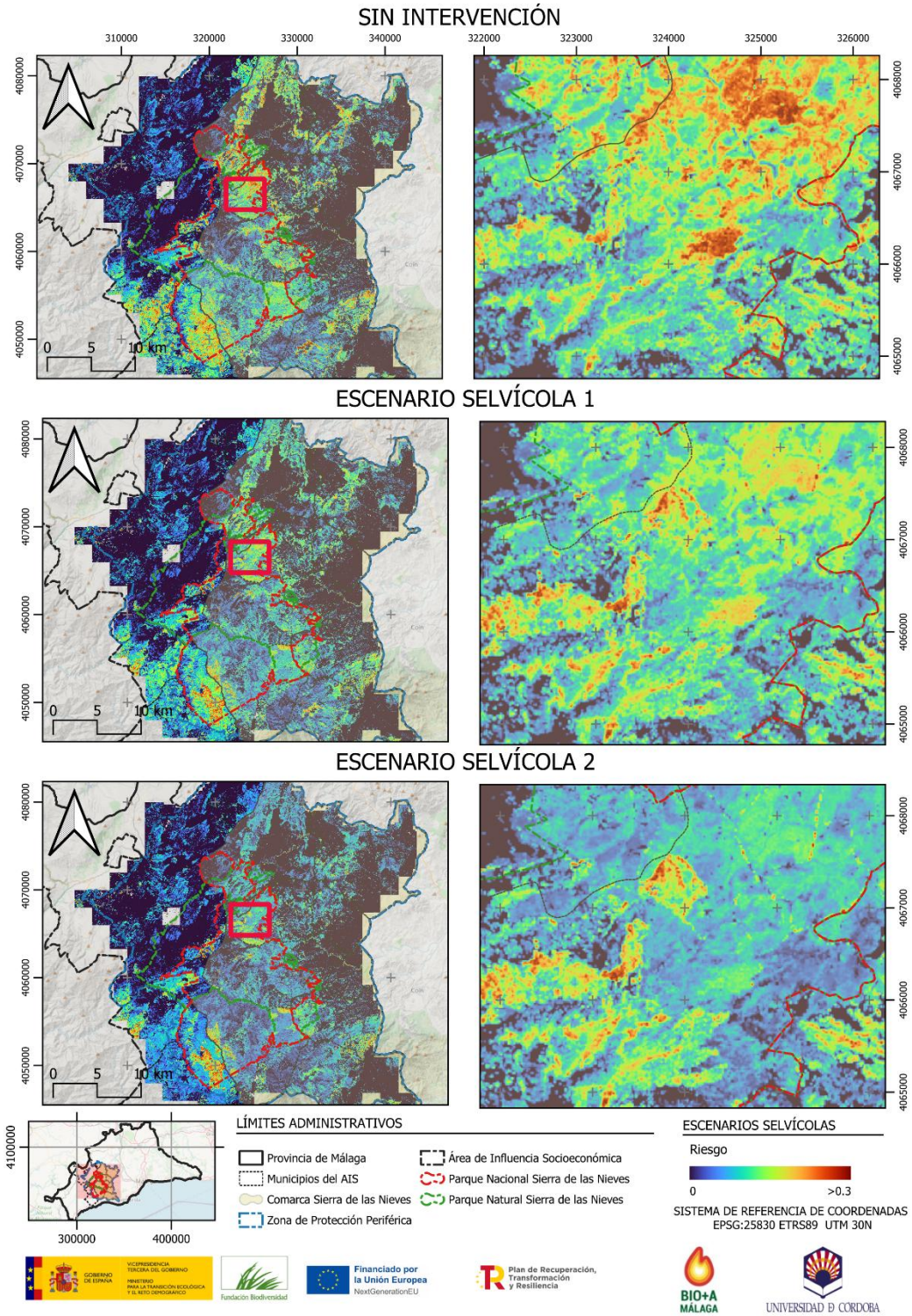


Figura 5: Distribución espacial de los valores de riesgo en la zona de protección periférica del Parque Nacional y Natural de la Sierra de las Nieves. Se destaca la ampliación de una región según los escenarios de gestión forestal (Sin intervención, régimen de aclareo con silvicultura tradicional con intensidades de ~30 % del área basal; y aclareo intenso con reducción del ~50 % del área basal).

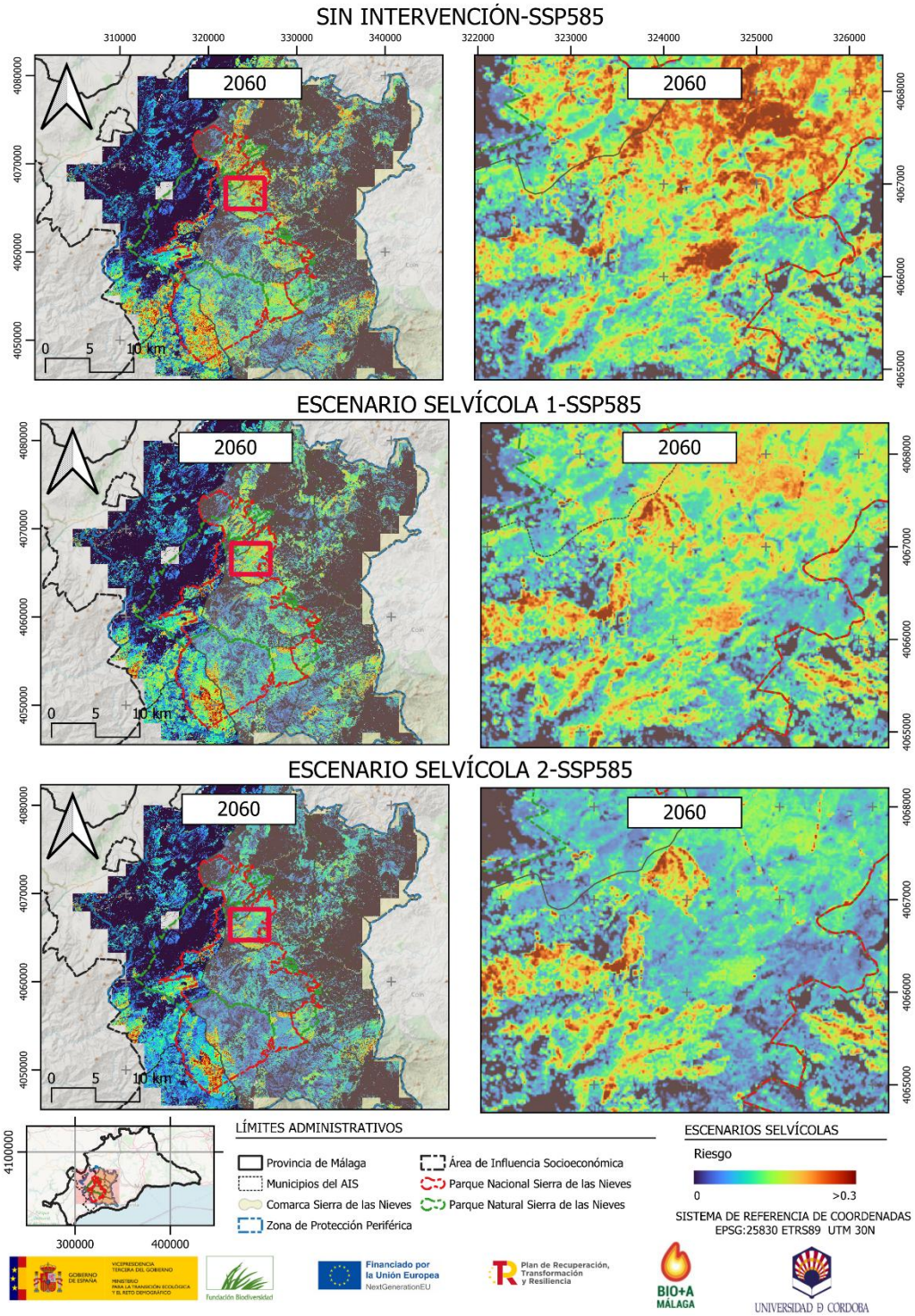


Figura 6: Distribución espacial de los valores de riesgo en la zona de protección periférica del Parque Nacional y Natural de la Sierra de las Nieves, teniendo en cuenta el escenario climático más desfavorable (SSP585) para el año 2060. Se destaca la ampliación de una región según los escenarios de gestión forestal (Sin intervención, régimen de aclareo con silvicultura tradicional con intensidades de ~30 % del área basal; y aclareo intenso con reducción del ~50 % del área basal)

6. Consideraciones metodológicas de la Acción 6.2.

La metodología propuesta en esta acción ofrece un modelo integral del paisaje forestal que incorpora el análisis de riesgos frente a perturbaciones, y la importancia de la selvicultura para adaptar los sistemas forestales en la comarca de Sierra de las Nieves.

Cabe destacar la importancia de las actuaciones selvícolas (ver Acción 2.5), que pueden mejorar la resiliencia forestal al reducir las alteraciones en los patrones de perturbación reduciendo así la incertidumbre de las proyecciones futuras de los regímenes de perturbación y sus interacciones con el cambio climático. El análisis, además, se ha centrado en un indicador de servicios ambientales (ej., biomasa), elegido para representar la estructura forestal y la composición de especies de sistemas forestales, por su relación directa con los objetivos del proyecto Bio+A.

La implantación de estrategias de adaptación de la gestión forestal en parques nacionales y zonas de amortiguamiento ha demostrado ser eficaz para reducir los riesgos de perturbación y preservar ciertos servicios ecosistémicos como la biomasa (p. ej., las reservas de carbono). Los resultados de la Acción 2.3. representa un paso fundamental para la evaluación de los riesgos de perturbación en parques nacionales y parques naturales cercanos, que puede extenderse a otros parques nacionales de España. Para lograr un análisis más detallado de cada área protegida, es necesario incorporar servicios ecosistémicos e indicadores de conservación adicionales. Es fundamental considerar los SE que son particularmente relevantes para las prioridades de conservación de cada área protegida (p. ej., biodiversidad, reducción de incendios, etc.). Además, las zonas de amortiguamiento, como los parques naturales, desempeñan un papel crucial en la prestación de servicios ecosistémicos esenciales. Dados los riesgos significativos y crecientes asociados al cambio climático en la región mediterránea, incluyendo el aumento de las amenazas derivadas de fenómenos extremos como sequías e incendios, se prevé una disminución de la productividad forestal.

Los indicadores globales de biodiversidad han experimentado un descenso en los últimos años, mientras que las presiones sobre la biodiversidad han aumentado. En este contexto, es crucial identificar las especies, funciones y procesos ecológicos específicos que contribuyen a la aplicación de estrategias de conservación adecuadas.

La futura planificación forestal de la comarca de Sierra de las Nieves debe considerar la distribución espacial de los riesgos y su cambio en diversos escenarios de cambio climático. Por lo tanto, el enfoque no debe centrarse únicamente en las áreas protegidas como sistemas aislados. Las áreas protegidas se ubican en mosaicos paisajísticos más amplios que pueden influir en los impactos de los riesgos, lo que enfatiza la necesidad de que la planificación de la conservación del paisaje abarque tanto las zonas de amortiguamiento como las no protegidas.

Además, es esencial el seguimiento continuo del impacto de las intervenciones de gestión forestal en áreas protegidas específicas y sus zonas de amortiguamiento. Esta evaluación debe reconocer la naturaleza dinámica de los paisajes y los tipos de sistemas forestales dominantes, que incluyen también otros sistemas de alto valor ambiental como las formaciones de matorral. La integración de la gestión forestal, la ecología del paisaje y la evaluación de riesgos es vital para desarrollar estrategias integrales de conservación que consideren las interacciones dinámicas entre la naturaleza y la sociedad.