

Giambelluca, A.; González-Audicana, M.; Hermosilla, T.; Álvarez-Mozos, J. Evaluación del efecto del estrés ambiental, la severidad y el estado pre-incendio en la recuperación post-incendio de masas de Pinus y Quercus.

# Evaluación del efecto del estrés ambiental, la severidad y el estado pre-incendio en la recuperación post-incendio de masas de Pinus y Quercus.

Giambelluca, Ana Laura <sup>1</sup> González-Audicana, María <sup>1</sup> Hermosilla, Txomin <sup>2</sup> Álvarez-Mozos, Jesús <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Sustainability & Food Chain Innovation (IS-FOOD), Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra, Arrosadia s/n, 31006 Pamplona, España.

<sup>2</sup> Canadian Forest Service, 506 Burnside Rd W, Victoria, BC V8Z 1M6, Canadá.

ORCID: Giambelluca 0000-0002-8551-8348 González-Audicana 0000-0002-2430-3853 Hermosilla 0000-0002-5445-0360 Álvarez-Mozos 0000-0002-6518-2533

Correspondencia: [analaura.giambelluca@unavarra.es](mailto:analaura.giambelluca@unavarra.es) [maria.audicana@unavarra.es](mailto:maria.audicana@unavarra.es) [txomin.hermosillagomez@nrcan-rncan.gc.ca](mailto:txomin.hermosillagomez@nrcan-rncan.gc.ca) [jesus.alvarez@unavarra.es](mailto:jesus.alvarez@unavarra.es)

## RESUMEN

Este estudio analiza la dinámica de recuperación forestal post-incendio de masas de Pinus y Quercus afectadas por incendios ocurridos en el año 2003 en Cataluña. El objetivo principal fue evaluar cómo factores topográficos, de estrés ambiental y la severidad del fuego influyen en el tiempo necesario para que la vegetación retorne a sus niveles de productividad primaria neta (NPP) previos al siniestro. Para ello, se empleó el modelo fisiológico simplificado Physiological Principles Predicting Growth from Satellites (3-PGS), en el que se integraron series temporales de la colección Landsat abarcando el período entre 2000 y 2020. Los resultados indicaron que la gran mayoría de las áreas estudiadas lograron recuperarse en este periodo de tiempo. No obstante, se observaron diferencias significativas entre géneros: Quercus mostró una recuperación más veloz que Pinus, especialmente durante el primer año posterior al fuego. Entre las variables evaluadas, la elevación y la severidad del incendio resultaron determinantes. Las zonas situadas a mayor altitud y aquellas que sufrieron incendios más intensos mostraron periodos de recuperación más prolongados en ambos tipos de bosques.


**Palabras clave:** Bosque mediterráneo, Recuperación, Landsat, 3-PGS, NPP


Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 17 febrero 2026


# Evaluación del efecto del estrés ambiental, la severidad y el estado pre-incendio en la recuperación post-incendio de masas de *Pinus* y *Quercus*.

Giambelluca, Ana Laura <sup>(1)</sup>, González-Audicana, María <sup>(1)</sup>, Hermosilla, Txomin <sup>(2)</sup>, Álvarez-Mozos, Jesús <sup>(1)</sup>


<sup>(1)</sup> Institute for Sustainability & Food Chain Innovation (IS-FOOD), Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra, Arrosadía s/n Pamplona, España.

 0000-0002-8551-8348, analaura.giambelluca@unavarra.es

 0000-0002-2430-3853, maria.audicana@unavarra.es

 0000-0002-6518-2533, jesus.alvarez@unavarra.es

<sup>(2)</sup> Canadian Forest Service W, Canadá.

 0000-0002-5445-0360, txomin.hermosillagomez@nrcan-rncan.gc.ca

**Resumen:** Este estudio analiza la dinámica de recuperación forestal post-incendio de masas de *Pinus* y *Quercus* afectadas por incendios ocurridos en el año 2003 en Cataluña. El objetivo principal fue evaluar cómo factores topográficos, de estrés ambiental y la severidad del fuego influyen en el tiempo necesario para que la vegetación retorne a sus niveles de productividad primaria neta (NPP) previos al siniestro. Para ello, se empleó el modelo fisiológico simplificado *Physiological Principles Predicting Growth from Satellites* (3-PGS), en el que se integraron series temporales de la colección Landsat abarcando el período entre 2000 y 2020. Los resultados indicaron que la gran mayoría de las áreas estudiadas lograron recuperarse en este período de tiempo. No obstante, se observaron diferencias significativas entre géneros: *Quercus* mostró una recuperación más veloz que *Pinus*, especialmente durante el primer año posterior al fuego. Entre las variables evaluadas, la elevación y la severidad del incendio resultaron determinantes. Las zonas situadas a mayor altitud y aquellas que sufrieron incendios más intensos mostraron períodos de recuperación más prolongados en ambos tipos de bosques.

**Palabras clave:** Bosque mediterráneo, Recuperación, Landsat, 3-PGS, NPP.

## ***Evaluation of the effect of environmental stress, severity and pre-fire condition on the post-fire recovery of *Pinus* and *Quercus* stands.***

**Abstract:** This study analyzes the dynamics of post-fire forest recovery of *Pinus* and *Quercus* stands affected by fires in 2003 in Catalonia. The main objective was to evaluate how topographic factors, environmental stress factors, and fire severity influence the time required for vegetation to return to its pre-fire levels of net primary productivity (NPP). To this end, the simplified physiological model *Physiological Principles Predicting Growth from Satellites* (3-PGS) was used, into which Landsat image time series were integrated covering the period between 2000 and 2020. The results indicated that the vast majority of the studied areas recovered within the analyzed period. However, significant differences were observed between genera: *Quercus* showed a faster recovery than *Pinus*, especially during the first year after the fire. Among the variables evaluated, elevation and fire severity proved to be determining factors. The areas located at higher altitudes and those that suffered more intense fires showed longer recovery periods in both types of forests.

**Keywords:** Mediterranean forest, Recovery, Landsat, 3-PGS, NPP.

## 1. INTRODUCCIÓN

Conocer la dinámica de recuperación forestal post-incendio es fundamental para implementar medidas de manejo adaptadas a la resiliencia de los ecosistemas mediterráneos. Este conocimiento cobra mayor

importancia en el contexto actual, con un incremento en la severidad y frecuencia de los incendios.

En las especies Mediterráneas, las estrategias adaptativas post-incendio varían significativamente. El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) basa su recuperación en la liberación y dispersión de semillas

mediante conos serótimos, mientras que la encina (*Quercus ilex* L.) lo hace a través del rebrote (Rodríguez *et al.*, 2024). Más allá de la especie, la recuperación forestal está condicionada por la interacción compleja de múltiples factores como la topografía, la meteorología y la severidad del incendio, con conclusiones aún poco consistentes debido tanto a la diversidad de metodologías propuestas para su medición, como a la ausencia de una definición universal del concepto de recuperación (White, 2024).

El trabajo de campo constituye una de las vías más precisas para evaluar la recuperación de un bosque. Sin embargo, cuando se trata de monitorizar superficies extensas, la teledetección se presenta como una herramienta eficiente y económica. No obstante, la saturación de los índices de vegetación tradicionales supone un desafío para estimar la biomasa realmente recuperada (Bonannella *et al.*, 2022). Para superar estas limitaciones, existen modelos basados en procesos, como el “*Physiological Principles Predicting Growth from Satellites*” (3-PGS) (Coops *et al.*, 1998). Estos modelos integran la fisiología forestal y la energía absorbida por el dosel para estimar la Productividad Primaria Bruta y Neta (GPP/NPP), basando la estimación de la fracción fotosintéticamente activa (fPAR) en el índice normalizado de vegetación (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974).

Este trabajo tiene como objetivo evaluar cómo las variables topográficas, el estrés ambiental abiótico, el NPP pre-incendio y severidad influyen en la recuperación de masas de *Pinus* y *Quercus*.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Datos

Este estudio se centró en la Comunidad Autónoma de Cataluña, España. Se utilizaron perímetros de incendios en formato vectorial proporcionados por el gobierno autonómico (Generalitat de Catalunya, 2024) correspondientes al año 2003, evaluándose un total de 17 eventos.

A partir de datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 2016 (IGN, 2024), se generó una malla de 30 m coincidente con la resolución de Landsat. Se excluyeron los píxeles sin cobertura arbórea (altura < 3 m y fracción de cubierta < 10%). Sobre la superficie forestal resultante, se aplicó un muestreo aleatorio estratificado mediante el paquete *spatialEco* de R, estableciendo una distancia mínima de 100 m entre puntos para reducir la autocorrelación espacial. En total se seleccionaron 750 píxeles como píxeles de estudio.

Se procesaron imágenes de la colección Landsat 5, 7 y 8 correspondientes al periodo 2000-2020 en *Google Earth Engine*. Se descartaron las escenas con nubosidad superior al 50%, y se aplicó la máscara de nubes empleando la banda QA\_pixel. Para cada imagen, se calculó el NDVI y el índice de Área quemada (NBR) (Key & Benson, 2006).

Las variables topográficas se derivaron del modelo digital del terreno ASTER GDEM (ASTER Science Team, 2019). Las variables climáticas de precipitación y

temperaturas (mínima y máxima) se obtuvieron de ClimaEU (Marchi *et al.*, 2020), mientras que la radiación solar y los días de helada se extrajeron de ERA5 (Copernicus Climate Change Service, 2020). Todas las variables fueron remuestreadas a una resolución de 30 m.

### 2.2. Modelo 3-PGS

La recuperación forestal post-incendio se monitorizó mediante la estimación de la NPP mensual utilizando el modelo 3-PGS. Se consideró un bosque como recuperado cuando su NPP post-incendio alcanzó al menos el 80% del valor de NPP previo al incendio, definido como la media de los valores máximos de los dos años previos al incendio. Para cada píxel se cuantificó el tiempo necesario para alcanzar este umbral, denominado Y2R (*Years to Recover*). Además, se calculó la tasa de recuperación (TR), como el cociente entre la severidad del incendio y el Y2R.

Para la estimación de la NPP, el modelo 3-PGS requiere datos medios mensuales de NDVI, temperaturas extremas (máxima y mínima), déficit de presión de vapor (VPD), radiación y precipitación, así como los días de helada por mes. El cálculo de la radiación absorbida por el dosel (APAR) se deriva de la radiación incidente y la fracción de radiación fotosintéticamente activa (fPAR), esta última estimada a partir del NDVI. Posteriormente, la eficiencia fotosintética se ajusta mediante modificadores ambientales que representan condiciones de estrés, permitiendo el cálculo de la APAR utilizable (APAR<sub>u</sub>). Estos modificadores, cuyos valores oscilan entre 0 (limitación total) y 1 (condiciones óptimas), penalizan la productividad potencial, principalmente, en función del balance hídrico del suelo (fSW), el déficit de presión de vapor (fVPD), las temperaturas extremas (fTemp) y el régimen de heladas. La GPP se obtiene multiplicando la APAR<sub>u</sub> calculada por la eficiencia en el uso de la luz por el dosel (valor empírico = 1.8 gC/MJ). Finalmente, la NPP se estima como el 47% de la GPP (Landsberg & Waring, 1997). Para estandarizar la comparación interanual, se analizaron los valores máximos anuales de NPP y se calculó su tendencia. La cantidad de años necesaria para que la línea de tendencia supere el umbral pre-incendio se registró como el Y2R del píxel.

### 2.3. Variables analizadas

Se evaluó la influencia de ocho variables en la recuperación del bosque: tres variables topográficas (elevación, pendiente y orientación), tres factores de estrés ambiental (fSW, fTemp y fVPD), la severidad del incendio y la NPP pre-incendio. La orientación se transformó mediante el índice TRASP (Roberts & Cooper, 1989), donde el valor 0 corresponde a exposiciones frescas y el valor 1 a laderas xéricas. Los factores de estrés usados se calcularon como la media del modificador en el periodo vegetativo (mayo-octubre) durante los primeros cinco años post-incendio, periodo crítico para la recuperación. La severidad del incendio se calculó como la diferencia entre el NBR pre-incendio y post-incendio (dNBR).

## 2.4. Análisis

El análisis se estratificó por género (*Pinus* y *Quercus*). Las diferencias en las distribuciones acumuladas de recuperación se evaluaron mediante el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S). La relación entre las variables ambientales, Y2R y la tasa de recuperación se determinó mediante correlaciones de Pearson. Asimismo, se empleó el test de Kruskal-Wallis y una prueba *post hoc* de Bonferroni para identificar diferencias significativas de cada variable, considerando cuatro categorías de recuperación definidas por los cuartiles del Y2R (< 4 años, 4-7 años, 7-11 años y > 11 años).

## 3. RESULTADOS

Las masas de *Quercus* mostraron una recuperación más rápida que las de *Pinus* (Figura 1), con diferencias estadísticamente significativas en la proporción de área recuperada ( $p < 0.05$ , test K-S). fSW fue el que presentó mayor correlación con los Y2R y la TR, tanto en *Pinus* ( $r = 0.61$ ,  $r = -0.64$ ) como en *Quercus* ( $r = 0.59$ ,  $r = -0.62$ ) (Tabla 1). Esta relación sugiere que, a menor estrés hídrico, los bosques tardan más tiempo en recuperarse al tener una TR de recuperación más baja.

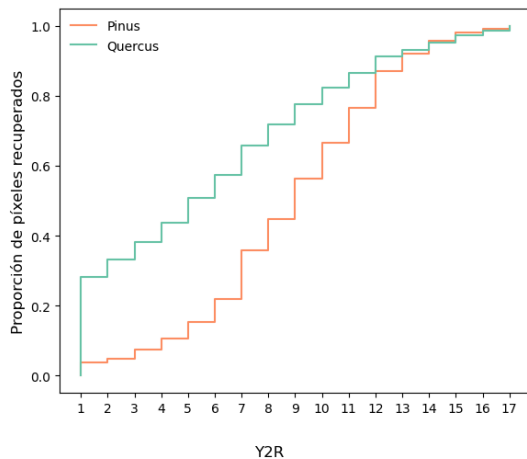


Figura 1. Proporción de píxeles recuperados considerando el

tiempo necesario para alcanzar la recuperación (Y2R).

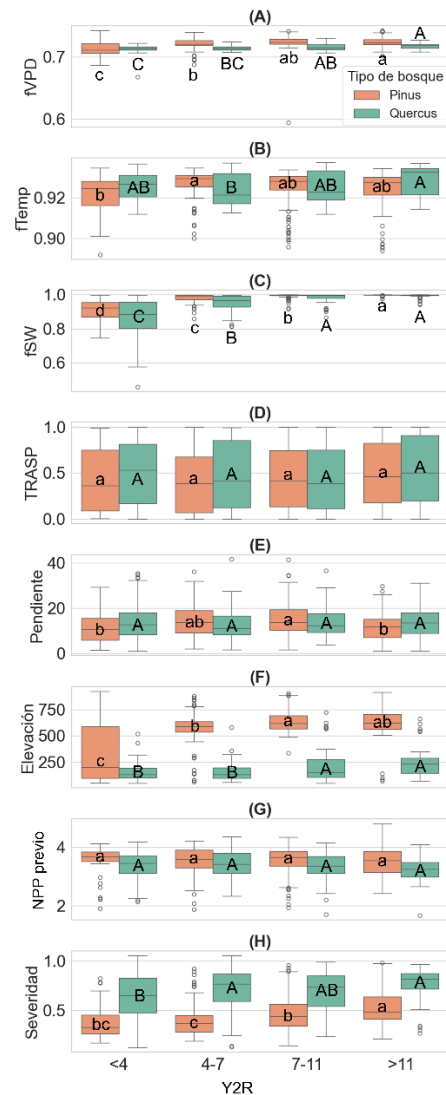


Figura 2. Diferencias significativas entre el mismo tipo de bosque, considerando 4 clases de Y2R.

Tabla 1. Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables analizadas junto con los años para recuperarse (Y2R) y la tasa de recuperación (TR) por tipo de bosque. Diagonal superior datos de *Pinus*. Diagonal inferior datos de *Quercus*.

		Pinus									
		fVPD	fTemp	fSW	TRASP	Pendiente	Elevación	Severidad	NPP previo	Y2R	TR
Quercus	fVPD		-0.37	0.29	0.08	0.14	0.76	0.05	0.41	0.28	-0.27
	fTemp	0.71		0.14	-0.04	-0.08	-0.34	-0.07	-0.31	0.02	-0.11
	fSW	0.12	-0.07		0.09	0.11	0.56	0.10	-0.24	0.61	-0.64
	TRASP	-0.07	-0.11	0.06		-0.02	0.00	-0.04	-0.16	0.06	0.03
	Pendiente	0.26	0.39	0.01	-0.08		0.25	0.01	0.09	-0.01	-0.13
	Elevación	0.73	0.70	0.16	-0.15	0.21		0.03	0.29	0.41	-0.51
	Severidad	0.17	0.19	0.04	-0.09	0.09	-0.01		0.16	0.30	0.22
	NPP previo	0.24	0.18	-0.51	-0.27	0.01	0.23	0.24		-0.05	0.05
	Y2R	0.26	0.06	0.59	-0.02	-0.01	0.28	0.18	-0.09		-0.56
	TR	-0.09	0.13	-0.62	0.02	0.10	-0.13	0.17	0.15	-0.73	

Dado que la mayoría de los píxeles presentan un estrés hídrico leve, estos resultados sugieren que la adaptación pirófila de los bosques mediterráneos actúa como un mecanismo de compensación, evitando que un déficit hídrico leve limite la recuperación. Las zonas más elevadas presentaron tiempos de recuperación más largos con TR más bajas (Tabla 1 y Figura 2F). Esto podría deberse a su correlación positiva con la NPP (Tabla 1): a mayor biomasa quemada, mayor es el tiempo necesario para retornar a los valores pre-incendio. Los incendios más severos mostraron tiempos de recuperación más prolongados (Tabla 1 y Figura 2H) a pesar de presentar TR mayores. Esto puede deberse a la asociación positiva con la NPP, sugiriendo que una mayor carga de combustible en el terreno incrementa la severidad del incendio, así como una mayor complejidad del bosque permitiría un rebrote mayor (banco de semillas, pies para rebrotar). Cabe destacar que los ejemplares de *Pinus* se localizaron en sitios significativamente más altos y con menor severidad que los ejemplares de *Quercus* (Figura 2F y H).

#### 4. CONCLUSIONES

La elevación, la severidad del incendio y la NPP pre-incendio fueron las variables más estrechamente ligadas a los mayores tiempos de recuperación. Valores más elevados de estos factores implicaron un retraso en la recuperación. No obstante, una mayor severidad y NPP pre-incendio también se relacionaron con incrementos en la tasa de recuperación, probablemente debido a la reducción de competencia y a la persistencia de remanente de bosque que facilita su rebrote. Las masas de *Quercus* se localizaron en zonas de menor altitud, las severidades de los incendios fueron estadísticamente superiores; no obstante, su elevada capacidad de rebrote podría estar compensando estas condiciones, lo que se traduce en una mayor área recuperada en los primeros años. Por el contrario, las masas de *Pinus* alcanzaron la recuperación de la mayor parte de su superficie en años posteriores, al depender exclusivamente de la dispersión y germinación de semillas y localizarse en zonas más elevadas.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al grupo IRSS de la Universidad de la Columbia Británica por su apoyo para la comprensión del modelo 3-PGS. Esta investigación ha sido financiada por medio de las “Ayudas predoctorales 2022 del Gobierno de Navarra para la realización de programas de doctorado de interés para Navarra”, identificación BDNS: 631887. Y por medio del proyecto DAMAGE (PID 2023 152885 OB I 00 financiado por MCIU/AEI/ 10 13039 501100011033 / UE).

#### 6. REFERENCIAS

ASTER Science Team. (2019). ASTER Global Digital Elevation Model V003. <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003>

Bonannella, C., Chirici, G., Travaglini, D., Pecchi, M., Vangi, E., D'Amico, G., & Giannetti, F. (2022). Characterization of Wildfires and Harvesting Forest

Disturbances and Recovery Using Landsat Time Series: A Case Study in Mediterranean Forests in Central Italy. *Fire*, 5(3), 68. <https://doi.org/10.3390/fire5030068>

Coops, N. C., Waring, R. H., & Landsberg, J. J. (1998). Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management*, 104(1-3), 113-127. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00248-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00248-X)

Copernicus Climate Change Service. (2020). E-OBS daily gridded meteorological data for Europe from 1950 to present derived from in-situ observations. ECMWF. <https://doi.org/10.24381/CDS.151D3EC6>

Generalitat de Catalunya. (2024). Wildfires of Catalonia. <https://agricultura.gencat.cat/>

Instituto Geográfico Nacional. (2024). PNOA LiDAR. <https://pnoa.ign.es/>

Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA). In D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson, S. Sutherland, & L. J. Gangi (Eds.), FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system (Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD, pp. LA-1-55). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Landsberg, J. J., & Waring, R. H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95(3), 209-228. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1)

Marchi, M., Castellanos-Acuña, D., Hamann, A., Wang, T., Ray, D., & Menzel, A. (2020). *ClimateEU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe*. *Scientific Data*, 7(1), 428. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00763-0>

Roberts, D. W., & Cooper, S. V. (1989). Concepts and techniques of vegetation mapping. In Proceedings of a symposium—Land classifications based on vegetation: Applications for resource management (pp. 90-96). USDA Forest Service General Technical Report INT-257.

Rodrigues, M., De La Riva, J., Domingo, D., Lamelas, T., Ibarra, P., Hoffrén, R., & García-Martin, A. (2024). An empirical assessment of the potential of post-fire recovery of tree-forest communities in Mediterranean environments. *Forest Ecology and Management*, 552, 121587. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121587>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation (CR-144661). Remote Sensing Center Texas A&M University.

White, J. C. (2024). Characterizing forest recovery following stand-replacing disturbances in boreal forests: *Contributions of optical time series and airborne laser scanning data*. *Silva Fennica*, 58(2), 23076. <https://doi.org/10.14214/sf.23076>