

Marino del Amo, E.; Arellano Pérez, S.; Villegas Ranera, O.; Carrillo García, C.; Martín Alcón, S.; Tomé Morán, J.; Madrigal Olmo, J.; Guijarro Guzmán, M. Simulación de la evolución del riesgo de incendio basado en LiDAR multitemporal: efecto de la gestión de la madera quemada a escala de paisaje en masas de *Pinus pinaster*

# Simulación de la evolución del riesgo de incendio basado en LiDAR multitemporal: efecto de la gestión de la madera quemada a escala de paisaje en masas de *Pinus pinaster*

Marino del Amo, Eva<sup>1</sup> Arellano Pérez, Stefano<sup>2</sup> Villegas Ranera, Olmo<sup>3</sup> Carrillo García, Cristina<sup>1</sup> Martín Alcón, Santiago<sup>2</sup> Tomé Morán, José Luis<sup>2</sup> Madrigal Olmo, Javier<sup>1</sup> Guijarro Guzmán, Mercedes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ICIFOR-INIA, CSIC, España

<sup>2</sup> Agresta Sociedad Cooperativa, España

<sup>3</sup> ETSI Forestal y Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid, España

ORCID: Marino del Amo 0000-0002-2397-5543 Arellano Pérez 0000-0003-2164-8618 Carrillo García 0000-0002-7486-072X Martín Alcón 0000-0002-5327-5695 Tomé Morán 0000-0003-2298-9115 Madrigal Olmo 0000-0001-7614-0737 Guijarro Guzmán 0000-0001-6460-9171

Correspondencia: [eva.marino@inia.csic.es](mailto:eva.marino@inia.csic.es) [sarellano@agresta.org](mailto:sarellano@agresta.org) [o.villegas@alumnos.upm.es](mailto:o.villegas@alumnos.upm.es) [cristina.carrillo@inia.csic.es](mailto:cristina.carrillo@inia.csic.es) [smalcon@agresta.org](mailto:smalcon@agresta.org) [jltome@agresta.org](mailto:jltome@agresta.org) [incendio@inia.csic.es](mailto:incendio@inia.csic.es) [guijarro@inia.csic.es](mailto:guijarro@inia.csic.es)

## RESUMEN

Conocer el impacto de alternativas de gestión de la madera quemada sobre la regeneración post-incendio y los combustibles forestales asociados a lo largo del tiempo es fundamental para determinar el riesgo de recurrencia y severidad potencial del fuego. Este estudio analizó los efectos a medio plazo de la gestión post-incendio de la madera quemada en masas de *Pinus pinaster* tras el incendio de El Rodenal (Guadalajara, 2005), que afectó más de 12.000 ha incluyendo pinares jóvenes y maduros. A partir de la caracterización de los combustibles existentes 8 y 16 años después del fuego (2013 y 2021), se analizó la evolución del riesgo de incendio a escala de paisaje comparando la corta y saca de la madera quemada (escenario real) frente a no intervención (escenario ficticio). Se generó cartografía de modelos de combustible post-incendio a partir de la primera y segunda cobertura LiDAR-PNOA, asociando los parámetros de cargas y alturas en función de datos de parcelas de seguimiento de la regeneración. Con las cartografías obtenidas se realizaron simulaciones del comportamiento del fuego bajo distintos escenarios de riesgo meteorológico (moderado, alto y extremo). Los resultados a escala de paisaje mostraron que la saca de madera redujo la carga de combustible grueso, pero favoreció la regeneración de herbáceas y matorral, aumentando la continuidad del combustible y el riesgo de mayor velocidad de propagación. Por el contrario, la no intervención favoreció árboles muertos en pie, retrasando la regeneración, pero acumulando gran cantidad de combustible muerto que aumentó la intensidad y severidad potencial del fuego. En ambos casos, la evolución de la vegetación tras incendio mostró un aumento de la carga de combustible y su riesgo asociado. Este estudio destaca la necesidad de realizar una gestión preventiva tras el fuego a medio plazo, para reducir la recurrencia de incendios severos y evitar daños irreversibles en ecosistemas previamente quemados.

**Palabras clave:** Regeneración post-incendio, LiDAR-PNOA, modelos de combustible, comportamiento del fuego, FlamMap

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026




# Simulación de la evolución del riesgo de incendio basado en LiDAR multitemporal: efecto de la gestión de la madera quemada a escala de paisaje en masas de *Pinus pinaster*

Marino del Amo, Eva <sup>(1)</sup>, Arellano Pérez, Stefano <sup>(2)</sup>, Villegas Ranera, Olmo <sup>(3)</sup>, Carrillo García, Cristina <sup>(1)</sup>, Martín Alcón, Santiago <sup>(2)</sup>, Tomé Morán, José Luis <sup>(2)</sup>, Madrigal Olmo, Javier <sup>(1)</sup>, Guijarro Guzmán, Mercedes <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> ICIFOR-INIA, CSIC, España.

 0000-0002-2397-5543, eva.marino@inia.csic.es ;  0000-0002-7486-072X, cristina.carrillo@inia.csic.es  
 0000-0001-7614-0737, incendio@inia.csic.es ;  0000-0001-6460-9171, guijarro@inia.csic.es

<sup>(2)</sup> Agresta Sociedad Cooperativa, España.

 0000-0003-2164-8618, sarellano@agresta.org ;  0000-0002-5327-5695, smalcon@agresta.org  
 0000-0003-2298-9115, jltome@agresta.org

<sup>(3)</sup> ETSI Forestal y Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid, España.

o.villegas@alumnos.upm.es

**Resumen:** Conocer el impacto de alternativas de gestión de la madera quemada sobre la regeneración post-incendio y los combustibles forestales asociados a lo largo del tiempo es fundamental para determinar el riesgo de recurrencia y severidad potencial del fuego. Este estudio analizó los efectos a medio plazo de la gestión post-incendio de la madera quemada en masas de *Pinus pinaster* tras el incendio de El Rodenal (Guadalajara, 2005), que afectó más de 12.000 ha incluyendo pinares jóvenes y maduros. A partir de la caracterización de los combustibles existentes 8 y 16 años después del fuego (2013 y 2021), se analizó la evolución del riesgo de incendio a escala de paisaje comparando la corta y saca de la madera quemada (escenario real) frente a no intervención (escenario ficticio). Se generó cartografía de modelos de combustible post-incendio a partir de la primera y segunda cobertura LiDAR-PNOA, asociando los parámetros de cargas y alturas en función de datos de parcelas de seguimiento de la regeneración. Con las cartografías obtenidas se realizaron simulaciones del comportamiento del fuego bajo distintos escenarios de riesgo meteorológico (moderado, alto y extremo). Los resultados a escala de paisaje mostraron que la saca de madera redujo la carga de combustible grueso, pero favoreció la regeneración de herbáceas y matorral, aumentando la continuidad del combustible y el riesgo de mayor velocidad de propagación. Por el contrario, la no intervención favoreció árboles muertos en pie, retrasando la regeneración, pero acumulando gran cantidad de combustible muerto que aumentó la intensidad y severidad potencial del fuego. En ambos casos, la evolución de la vegetación tras incendio mostró un aumento de la carga de combustible y su riesgo asociado. Este estudio destaca la necesidad de realizar una gestión preventiva tras el fuego a medio plazo, para reducir la recurrencia de incendios severos y evitar daños irreversibles en ecosistemas previamente quemados.

**Palabras clave:** Regeneración post-incendio, LiDAR-PNOA, modelos de combustible, comportamiento del fuego, FlamMap.

## ***Simulation of wildfire risk evolution based on multitemporal LiDAR: effect of burned wood management at landscape scale in *Pinus pinaster* stands***

**Abstract:** Understanding the impact of different management options of burned wood on post-fire regeneration and associated forest fuels over time is essential for determining fire recurrence and potential severity. This study analyzed the medium-term effects of post-fire management of burned wood in *Pinus pinaster* forests following the El Rodenal wildfire (Guadalajara, 2005), which affected more than 12,000 hectares including young and mature pine stands. Based on the characterization of existing forest fuels 8 and 16 years after the fire (2013 and 2021), we evaluated the potential wildfire risk at landscape scale comparing two management options: logging and removal of burned wood (real scenario) versus no treatment (hypothetical scenario). Post-fire fuel model mapping was performed from the first and second coverage of LiDAR-PNOA flights

available in the study area. Load and height parameters were associated to each fuel model through field data from regeneration monitoring plots. Based on these maps, fire behaviour simulations were conducted in FlamMap under different weather risk scenarios (moderate, high, and extreme). The results at landscape level indicated that logging (real scenario) reduced coarse fuel load but encouraged regeneration of shrub and grass fuel types, increasing fuel continuity and the risk of fast-spreading fires. In contrast, absence of treatment (hypothetical scenario) preserved standing dead trees, delaying shrub encroachment but resulting in a significant accumulation of dead fuel that increased potential fire intensity and severity. These findings highlight the need of a proactive fuel management in regenerated vegetation after the fire in the mid-term in order to mitigate the potential recurrence of severe wildfires and prevent irreversible damage to previously burned ecosystems.

**Keywords:** Post-fire regeneration, LiDAR-PNOA, fuel models, fire behaviour, FlamMap

## 1. INTRODUCCIÓN

La restauración post-incendio en las masas forestales incluye diferentes estrategias dirigidas a recuperar la funcionalidad de los ecosistemas tras el fuego, mitigando sus efectos negativos. La retirada de la madera quemada mediante apeo del arbolado afectado es una de las prácticas habituales, tanto para favorecer la regeneración y aprovechar la madera de calidad de árboles muertos en pie, como para establecer fajinas y/o albarradas para control de la erosión. Sin embargo, se desconoce el efecto de esta gestión post-incendio en la evolución del paisaje combustible y en la peligrosidad de futuros incendios forestales, en especial en zonas con una alta severidad del fuego.

La tecnología LiDAR es una potente herramienta para evaluar los cambios estructurales en la vegetación a escala de paisaje. En España disponemos de varias coberturas nacionales de los vuelos LiDAR del PNOA, que permiten disponer de datos muy útiles para el análisis espacial y temporal de la regeneración en zonas afectadas por incendios.

El objetivo de este trabajo fue analizar la evolución estructural del combustible y el comportamiento del fuego asociado a escala de paisaje en una zona previamente quemada, según distintos escenarios de gestión post-incendio (extracción o no de la madera quemada) y condiciones ambientales (nivel de riesgo meteorológico). Para ello, se desarrolló una metodología que combina cartografía previa, datos de campo, datos LiDAR y simulaciones de incendios forestales.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

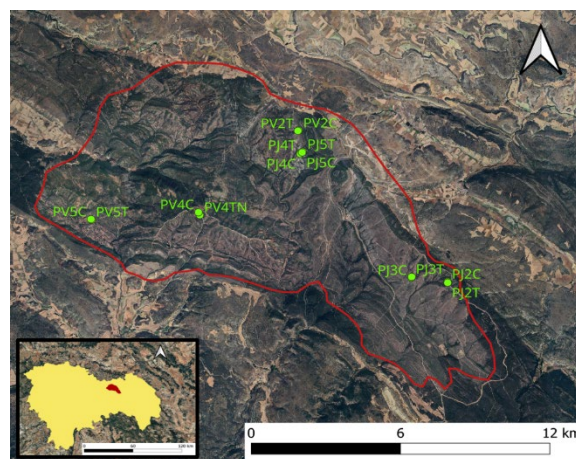
### 2.1. Área de estudio y datos de campo

El área de estudio abarca la superficie afectada por el gran incendio forestal ocurrido en la comarca de El Rodenal (Guadalajara) en 2005 que afectó a 12.875 hectáreas (Fig. 1). La mayoría del área quemada correspondía a masas arboladas dominadas por pinares jóvenes (PJ, latizal de 30-40 años) y maduros (PV, fustal de 80-90 años) de *Pinus pinaster*.

En esta zona quemada se disponía de información de 14 parcelas permanentes (40 x 40 m), establecidas tras el incendio por TRAGSA, en las que el laboratorio de

incendios forestales del ICIFOR-INIA llevó a cabo el seguimiento de la regeneración a largo plazo. El diseño de experimental incluía pares de parcelas con distinto tipo de gestión post-incendio en ambas masas de pinar (PJ y PV):

- corta y saca de la madera quemada (escenario real, aplicado en la mayoría del incendio).
- sin intervención (escenario ficticio, existente sólo en las parcelas testigo no cortadas).



**Figura 1.** Área de estudio en la provincia de Guadalajara, con perímetro del incendio (rojo) y ubicación de las parcelas de muestreo (verde) en las masas de pinar.

La caracterización del combustible forestal existente tras el incendio, compuesto mayormente por regenerado de jara (*Cistus* sp.), rebollo (*Quercus pyrenaica*) y pino (*P. pinaster*), se determinó a partir de la información obtenida en muestreos destructivos en las parcelas de campo para los años 2013 y 2021 (8 y 16 años tras el fuego, respectivamente). De esta forma se disponía de cuatro combinaciones posibles, diferenciando dos clases naturales de edad previa al incendio, pinar joven (PJ) y maduro (PV), y dos tipos de gestión: el escenario real de corta y saca de madera quemada (C, cortado) y el escenario ficticio de no intervención (T, testigo).

### 2.2. Datos LiDAR y generación de cartografía

A partir de la información de las parcelas de campo, para la caracterización del combustible a escala de paisaje se

han utilizado diferentes fuentes de datos. Por un lado, para la identificación de la estructura del combustible se utilizó LiDAR-PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) del IGN (Instituto Geográfico Nacional) correspondientes a vuelos de la 1ª (2009, 0,5 p/m²) y 2ª cobertura (2017, 1 p/m²) disponibles en la zona de estudio. La identificación de los tipos de vegetación en el área quemada se realizó a partir del Mapa Forestal Español (MFE) previo al incendio (MFE50 2004) y posterior (MFE25 2022). Esta información permitió segmentar la zona de estudio en función del tipo de masa arbolada previa (PV y PJ), así como áreas residuales de pastizal, matorral y otros tipos de arbolado existentes.

Siguiendo la metodología de Marino *et al.* (2016), en función del tipo de vegetación identificado (pastizal, matorral, arbolado) se definieron algoritmos específicos de clasificación de los combustibles según el sistema NFFL-Rothermel (Anderson 1982), pero con parámetros adaptados a la zona de estudio. Mediante análisis de regresión se analizó la correlación entre las métricas LiDAR y la altura del combustible medida en campo (*Fuel Depth*, FD) con el fin de extrapolar al resto del área de pinar afectado. Esta correlación se hizo diferenciando las parcelas según el tipo de masa (PJ y PV) en cada fecha de estudio (2013 y 2021). Las métricas seleccionadas y los umbrales calibrados con datos de campo se utilizaron para identificar modelos de combustible específicos. Para el escenario ficticio, en que sólo se disponía de datos LiDAR en las parcelas testigo no cortadas, se hizo un ajuste de los valores de las métricas seleccionadas a partir de la diferencia de los valores promedio entre los dos tipos de gestión: cortado (C) y testigo no cortado (T). En el resto de vegetación residual dentro del perímetro, al no tener datos de campo para correlacionar con los datos LiDAR, se utilizó la métrica que representa la altura media de los retornos (*zmean*), sin necesidad de ajustes para las cartografías del escenario real y ficticio al quedar fuera de las actuaciones post-incendio del pinar.

Aplicando los diferentes algoritmos definidos y los respectivos umbrales calibrados para las métricas LiDAR seleccionadas, que fueron procesadas en píxeles de 20m, se obtuvieron 4 cartografías ráster de modelos de combustible correspondientes a los escenarios real (corta y saca de madera quemada) y ficticio (no intervención) a los 8 y 16 años después del incendio. Para las simulaciones, a cada modelo se le asignaron los parámetros de cargas de cada escenario de gestión y masa previa derivados de los inventarios destructivos. En los modelos de combustible no presentes en las parcelas, se usaron los parámetros NFFL-Rothermel adaptados a combustibles mediterráneos derivados de trabajos previos (Arellano-Pérez *et al.* 2025).

### 2.3. Simulaciones y análisis del riesgo

Las cartografías de modelos de combustible obtenidas, junto al resto de capas ráster de 20 m necesarias como inputs (MDT, FCC, etc.), fueron utilizadas para generar archivos de paisaje (*landscape* o LCP) y realizar simulaciones con el software FlamMap (versión 6.2), obteniendo así el comportamiento del fuego asociado a cada tipología de complejos de combustible existentes en ambas fechas (2013 y 2021) según el escenario de gestión post-incendio (real y ficticio). En cuanto a las

condiciones ambientales, se simularon tres niveles de riesgo meteorológico (moderado, alto y extremo), que definen los parámetros de humedad del combustible vivo y muerto, y la velocidad del viento a 10 m de altura (Tabla 1). Estos valores fueron determinados mediante seguimiento del contenido de humedad en las parcelas de campo y datos de estaciones meteorológicas cercanas (Carrillo 2025).

**Tabla 1.** Condiciones de riesgo ambiental en las simulaciones. FMC, humedad del combustible (*fuel moisture content*)

| Variable                       | Nivel de riesgo |      |         |
|--------------------------------|-----------------|------|---------|
|                                | Moderado        | Alto | Extremo |
| FMC vivo (%)                   | 135             | 70   | 35      |
| FMC 1h                         | 9               | 7    | 5       |
| muerto (%) 10h                 | 10              | 8    | 6       |
| 100h                           | 12              | 10   | 8       |
| Viento a 10 m de altura (km/h) | 20              | 40   | 60      |

Las simulaciones realizadas en FlamMap fueron estáticas, considerando que ardieran todos los píxeles del área de estudio (i.e. independientemente del punto de ignición). Los resultados analizados fueron las principales variables de comportamiento de un incendio forestal, que permitieron obtener las zonas fuera de capacidad de extinción para los píxeles donde se cumplía al menos una de las siguientes situaciones:

- Velocidad de propagación (ROS) > 33 m/min
- Longitud de llama (FL) > 2,5 m
- Intensidad lineal del frente de llama (FI) > 4.000 kW/m

A partir de los resultados de estas cartografías derivadas de las simulaciones, se calcularon estadísticas para evaluar el impacto potencial de los incendios en cada escenario, tanto para cada variable de comportamiento del fuego como para las zonas fuera de capacidad de extinción.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

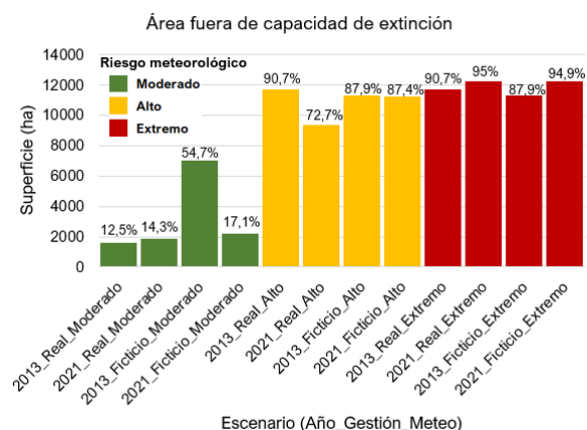
El análisis de regresión entre los datos LiDAR y los derivados de los inventarios de campo permitió elegir las mejores métricas para la estimación de la altura del combustible. Esta variable es fundamental para la determinación de modelos de combustible, y es habitualmente empleada para estimación de cargas en complejos de combustible de tipo matorral (Vega *et al.* 2022), que fueron los dominantes dentro la vegetación regenerada tanto en las parcelas como dentro del perímetro del incendio. En la Tabla 2 se muestran las métricas con mayor correlación, que varían en función del año analizado y tipo de masa arbolada previa al incendio (PJ y PV). Estas diferencias no sólo se pueden deber a la distinta estructura de los complejos de combustible observados en las parcelas para la vegetación regenerada, sino también a la diferente densidad entre los vuelos LiDAR-PNOA de la 1ª y 2ª cobertura (0,5 y 1 p/m²) utilizados para comparar en ambos años de seguimiento en campo. Para las masas de pinar maduro o fustal (PV), en la primera fecha de estudio (2013) se compararon los valores de las parcelas con la nube de puntos sólo por debajo de 2 m, con el fin

de evitar el ruido producido por los retornos de las copas de los árboles quemados aún en pie. Estos resultados también ponen de manifiesto la importancia de la calibración con datos de campo para mejorar el ajuste en la identificación de la estructura de los combustibles, en especial al extrapolarlos para generar cartografías a partir de vuelos LiDAR de distinta densidad de pulsos.

**Tabla 2.** Métricas LiDAR seleccionadas para estimar la altura del combustible regenerado. \* Retornos por debajo de 2 m

| Año  | Tipo de masa | Métrica LiDAR | R <sup>2</sup> |
|------|--------------|---------------|----------------|
| 2013 | PJ (latizal) | Percentil 80  | 0,998          |
|      | PV (fustal)  | Percentil 10* | 0,895          |
| 2021 | PJ (latizal) | Percentil 25  | 0,665          |
|      | PV (fustal)  | Percentil 30  | 0,903          |

En cuanto al comportamiento del fuego en los distintos escenarios, la gestión post-incendio tuvo un impacto significativo a escala de paisaje, siendo variable a lo largo del tiempo. Los resultados indicaron que la extracción de madera (escenario real) redujo la carga de combustible grueso, pero favoreció la regeneración de modelos de combustible de herbáceas y matorral, aumentando la continuidad del combustible y el riesgo de incendios de mayor velocidad de propagación. Por el contrario, la no intervención (escenario ficticio) dejó árboles muertos en pie, retrasando la regeneración inicial, pero acumulando gran cantidad de combustible muerto. Este combustible muerto, que fue cayendo e incorporándose a los combustibles de superficie, aumentó la intensidad y longitud de llama, y en consecuencia la severidad potencial del fuego. Independientemente de la gestión o no de la madera quemada, la evolución de la vegetación dentro del perímetro del incendio mostró un aumento de la carga de combustible y su riesgo asociado, estando actualmente fuera de capacidad de extinción para situaciones meteorológicas de riesgo alto y extremo (Fig. 2), habituales en la época estival y cada vez más frecuentes en los escenarios de cambio climático.



**Figura 2.** Superficie (ha y %) fuera de capacidad de extinción en los distintos escenarios simulados (2013 y 2021; Real vs Ficticio) según las condiciones meteorológicas de la Tabla 1.

A pesar de las limitaciones del estudio, como el número restringido de parcelas de campo o los desfases entre

los inventarios de combustible y las fechas de adquisición de los datos LiDAR-PNOA, los resultados son útiles para proporcionar información cuantitativa y espacial sobre las diferencias en el comportamiento potencial del fuego entre ambos escenarios de gestión y su evolución temporal.

#### 4. CONCLUSIONES

Este estudio propone una metodología de simulación del riesgo de incendio a partir de datos LiDAR aéreos de baja densidad para la evaluación de diferentes alternativas de gestión de las masas forestales quemadas a escala de paisaje. En el caso de estudio del incendio de El Rodenal de 2005, la evolución de los combustibles regenerados tras el fuego indica diferencias temporales en el comportamiento del fuego asociado a la extracción de la madera quemada del pinar frente a la no intervención, que se diluyen a lo largo del tiempo. Además, el riesgo potencial de recurrencia de incendio de alta intensidad observado a medio plazo apunta la necesidad de actuaciones urgentes de gestión del combustible para mitigar nuevos daños en estos ecosistemas ya quemados, que pueden ser aún más vulnerables en el actual contexto de cambio climático.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todas las personas del Laboratorio de Incendios Forestales del ICIFOR-INIA (CSIC) que han participado en los sucesivos inventarios de campo.

#### 6. REFERENCIAS

- Anderson, H.E. (1982). Aids to Determining FuelModels for Estimating Fire Behavior. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-122. p. 20.
- Arellano-Pérez, S., Molina-Martínez, J.R., Rodríguez y Silva, F., Tomé Morán, J.L., Martín-Alcón, S., Castelló, F.J., Senra, F., Marino, E. (2025). Manual de campo para la identificación y caracterización de los modelos de combustible de superficie de Andalucía. Junta de Andalucía, 202 pp.
- Carrillo, C. (2025). Vulnerabilidad frente al fuego de masas forestales del Sistema Ibérico Central. Tesis Doctoral. E.T.S. Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Univ. Politécnica de Madrid.
- Marino, E. Ranz P., Tomé, J.L., Noriega, M.A., Esteban, J., Madrigal, J. (2016). Generation of high-resolution fuel maps from discrete airborne LiDAR laser scanner data and Landsat-8 OLI: a low-cost and highly updated methodology for large areas. *Remote Sensing of Environment* 187, 267–280. DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.020.
- Vega, J.A., Arellano-Pérez, S., Álvarez-González, J.G., Fernández, C., Jiménez, E., Fernández-Alonso, J.M., Vega-Nieva, D.J., Briones-Herrera, C., Alonso-Rego, C., Fontúrbel, T., Ruiz-González, A.D. (2022). Modelling aboveground biomass and fuel load components at stand level in shrub communities in NW Spain. *Forest Ecology and Management*, 505, 119926. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119926.