



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Impacto térmico y reducción de hojarasca y mantillo por fuegos experimentales en condiciones de peligro alto de incendio en pinares de *Pinus nigra* y *P. pinaster*

JIMÉNEZ, E.^{1,2}, VEGA, J.A.¹, FONTURBEL, T.¹, ESPINOSA, J.^{3,4}, DE LA CRUZ, A.C.³, DÍEZ, C.³, CARRILLO, C.^{3,5}, GUIJARRO, M.^{3,6}, HERNANDO, C.^{3,6}, MATEO, J.F.⁷, ALMODOVAR, J.⁷ y MADRIGAL, J^{3,5,6}.

¹ Centro de Investigación Forestal de Lourizán (Xunta de Galicia).

² DGMNBEP. (Junta de Andalucía)

³ Centro de Investigación Forestal (INIA, CSIC).

⁴ Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia, Universidad de Valladolid.

⁵ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid.

⁶iuFOR, Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible, uVA-INIA.

⁷ Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.

Resumen

En junio de 2019 se realizaron fuegos experimentales en dos pinares de la provincia de Cuenca (El Pozuelo y Beteta), en condiciones de baja humedad del combustible muerto para evaluar la vulnerabilidad a corto y medio plazo de masas puras de *Pinus nigra* y mixtas de *P. nigra* y *P. pinaster* en incendios de superficie. Se alcanzaron temperaturas medias máximas de 452-539°C en la superficie de hojarasca (capa L), 312-328°C en la superficie del humus (capa H) y de 108-147°C en la superficie del suelo mineral, reflejando un impacto térmico del fuego en el suelo moderado-alto. La mortalidad del arbolado a corto plazo fue del 2-26%. Las temperaturas en la superficie de la corteza alcanzaron valores máximos medios comprendidos entre 515 y 568°C en *P. nigra*, mientras que en el cambium oscilaron entre 66 y 82°C. En *P. pinaster*, los valores medios fueron 443 y 46°C en la corteza exterior y en el cambium, respectivamente. La reducción relativa del espesor conjunto de las capas de hojarasca (L) y mantillo (FH) fue del 87,1% en El Pozuelo y del 89,9% en Beteta, respecto a los valores previos a la quema, mientras las cargas de las capas L, F y H sufrieron reducciones relativas del 93,5%, 93,5% y 77,1%, respectivamente. La altura media de chamuscado en el tronco osciló entre 2,9 y 5,4 m en *P. nigra*, y fue de 3,8 m en *P. pinaster*. El porcentaje medio del volumen de copa soflamada estuvo comprendido entre 47 y 52 % en *P. nigra*, y fue del 43 % en *P. pinaster*. En conjunto, el apreciable daño a la copa y al cambium del tronco, junto a la reducción de la cubierta orgánica del suelo evidenció un cuadro de moderada a alta severidad del fuego. Se concluye que el fuego ejecutado en condiciones fuera de la ventana de prescripción, representadas aquí por una humedad baja de la hojarasca y mantillo, y en una época de actividad vegetativa alta, puede tener un impacto negativo considerable en estos pinares, incluso con velocidad de viento y de propagación del fuego bajas.

Palabras clave

Incendios forestales, mortalidad, consunción de combustibles, régimen térmico.

1. Introducción

Se considera que el riesgo de incendios se va a incrementar en la cuenca Mediterránea en los años venideros, viéndose principalmente afectados los ecosistemas de pinares (MOREIRA et al. 2011). Consecuentemente, uno de los principales aspectos a evaluar es el efecto que pueden producir incendios de alta severidad del fuego en diferentes componentes de este tipo de sistemas forestales (combustibles forestales, arbolado, propiedades edáficas). A pesar de su importancia, el número de estudios en los que se llevan a cabo ensayos de campo con fuego experimental fuera de condiciones de prescripción en masas arbóreas es muy reducido en el ámbito mediterráneo, o están

enfocados, principalmente, a analizar el comportamiento del fuego (FERNANDES et al. 2004, 2009; RODRIGUEZ & SILVA 2017).

En este trabajo se presentan los resultados de un ensayo pionero en España en el que se evalúan los efectos de fuegos experimentales en pinares, efectuados en condiciones de alto peligro de incendio, sobre el régimen térmico, la consunción de combustibles y grado de afectación del arbolado.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es evaluar la influencia de la severidad del fuego en la resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas forestales. En particular, se pretende determinar los efectos sobre los combustibles, régimen térmico y daño al arbolado de fuegos experimentales ejecutados en condiciones de alto peligro en masas puras de *Pinus nigra* y mixtas de *P. nigra* - *P. pinaster*.

3. Metodología

Este trabajo se ha llevado a cabo en dos áreas forestales del centro-este de España, en la provincia de Cuenca: Beteta (masa pura de *P. nigra*) y El Pozuelo (masa mixta de *P. nigra*-*P. pinaster*), con dominancia de la primera de esas especies. Las características principales de las dos áreas de estudio se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características principales de las dos áreas de estudio. Error estándar entre paréntesis.

	Beteta	El Pozuelo
Localización	40°33'06" N 2°06'34" W	40°33'41" N 2°16'11" W
Altitud (m)	1280	1060
Precipitación media anual (mm)	854	710
Temperatura media anual (°C)	10,2	9,8
Litología	Caliza	Caliza
Suelo	Luvisol	Luvisol
Densidad de arbolado (ha ⁻¹)	900 (40)	950 (60)
Diámetro normal (cm)	20,6 (12,7)	18,7 (8,7)
Altura total (m)	12,4 (4,8)	13,0 (6,9)
Especies arbustivas dominantes en el sotobosque	<i>Genista scorpius</i> , <i>Rosa canina</i>	<i>Cistus laurifolius</i> , <i>Genista scorpius</i> , <i>Prunus spinosa</i>

En 2019, en cada una de las áreas experimentales se instalaron tres parcelas de 50 x 50 m en la que se efectuaron los fuegos experimentales. Dentro de cada una de ellas se estableció una subparcela de 30 x 30 m en las que se efectuaron las mediciones de consunción de combustibles, grado de afectación del arbolado y régimen térmico durante el fuego. Los experimentos se realizaron fuera de la ventana de prescripción, a finales de junio.

El combustible conductor del fuego fue el formado por la hojarasca superficial, ya que a pesar de la presencia de vegetación leñosa en el sotobosque se encontraba de forma dispersa en el terreno. La información detallada del complejo de combustible superficial se obtuvo mediante una técnica de doble muestreo. Los valores de carga de la capa de hojarasca (L), de fermentación (F) y de humus (H) se obtuvieron a partir de los valores de densidad aparente de cada capa específica de cada sitio (PRICHARD et al. 2017). Para ello, en primer lugar, se realizó un muestreo destructivo de esos combustibles cerca de las parcelas, pero fuera de ellas. Se tomaron 30 puntos de muestreo en un cuadrado de 30 x 30 cm, dispuesto aleatoriamente en cada una de las parcelas experimentales.

Se midió la profundidad de cada una de las capas en varios puntos en cada cuadrado, y se recogió todo el material separado por capa que fue transportado al laboratorio para el cálculo de su peso seco. En el caso de H, se descontó la posible contaminación por suelo mineral mediante combustión en mufla a 550°C. Los valores de densidad aparente se aplicaron en 49 puntos sistemáticos establecidos en la subparcela de 30 x 30 m para la obtención de los valores medios de carga por parcela.

Los fuegos experimentales (Figuras 1.a y 1.b) se efectuaron en Beteta el 18 de junio (de 12:00 a 17:00) y en El Pozuelo el 19 de junio (de 12:00 a 17:00). Fueron ejecutadas por el personal de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y los EPRIF. Se empleó la técnica de ignición por fajas con anchura de 2 a 5 m, ya que se pretendía conseguir un fuego de alta severidad, pero sin llegar a provocar un fuego de copas. Las líneas de ignición siguieron un patrón variable, ya que se ejecutaron perpendiculares a la dirección del viento prevalente en cada momento y utilizando la topografía como apoyo. La monitorización de la temperatura en la cubierta orgánica del suelo y este último se llevó a cabo en cuatro profundidades diferentes (superficie de la hojarasca, superficie del humus, superficie del suelo y a dos centímetros de profundidad). Estas mediciones se efectuaron en 13 puntos sistemáticamente localizados en la subparcela de 30 x 30 m, se empleándose termopares tipo K funda inconel, de 1 mm de diámetro, conectados a dataloggers, que almacenaban datos de temperatura cada segundo.



1.a



1.b

Figuras 1.a. y 1.b. Quemas experimentales realizadas en Beteta (masa pura de *Pinus nigra*) y El Pozuelo (masa mixta de *Pinus nigra* y *Pinus pinaster*) en junio de 2019.

Inmediatamente antes del fuego se tomaron muestras en cada una de las parcelas de restos leñosos finos (< 6 mm grosor) y de las capas de hojarasca (L), fermentación (F) y humus (H) y del suelo mineral superficial (0-2 cm) para la determinación de su humedad en laboratorio. La consunción del combustible superficial se obtuvo a partir de la medición del espesor residual en tres testigos metálicos colocados enrasados en la superficie de la hojarasca en cada uno de los 49 puntos empleados para la estimación de la carga superficial media por parcela. Inmediatamente después del fuego, cada uno de esos testigos fue reexaminado (Figura 2), midiéndose el grosor de las capas presentes, obteniéndose la carga remanente multiplicando este grosor por la densidad aparente correspondiente.

Con objeto de analizar el impacto térmico de las quemas en el arbolado, se seleccionaron 15 árboles representativos en cada parcela, de los que se midió el espesor de corteza, definida como la distancia máxima entre el cambium y la superficie de la corteza (más detalles en ESPINOSA et al. 2020). Con objeto de monitorizar las temperaturas alcanzadas durante las quemas en la corteza exterior y en la zona del cambium de los árboles seleccionados, se colocaron termopares en ambas

posiciones, a 0,60 m de la base del tronco (Figura 3). Los termopares, de tipo K de 1 mm de diámetro, se conectaron a dataloggers, registrando la temperatura cada segundo. Posteriormente al fuego, se determinó visualmente la mortalidad del arbolado, así como el porcentaje del volumen de copa soflamada y se midió la altura media de chamuscado del tronco en los 15 árboles seleccionados de cada parcela.



Figura 2. Testigos metálicos para la evaluación de la consunción del combustible superficial tras una quema prescrita.



Figura 3. Localización de los termopares en la superficie de la corteza y a nivel del cambium para la monitorización de las temperaturas en el arbolado durante las quemas experimentales (Fuente: ESPINOSA et al. 2020).

4. Resultados

En la Tabla 2 se presentan los valores medios de espesor, carga y humedad de los combustibles por estrato antes del fuego para cada uno de los sitios de estudio (Beteta y El Pozuelo). Los valores de humedad de los combustibles muestran claramente que los fuegos experimentales se realizaron fuera de ventana de prescripción, respecto a estas variables.

Las temperaturas máximas alcanzadas en la superficie de la capa L, capa H, suelo mineral y a 2 cm debajo de la superficie del suelo se indican en la Tabla 3.

En la Tabla 4 se muestran las cargas remanentes de combustible tras el fuego. La reducción del espesor de la capa orgánica superficial fue del 93,1% en El Pozuelo y del 96,2% en Beteta. Las

cargas de las capas L, F y H sufrieron reducciones medias del 93,5%, 93,5% y 77,1%, respectivamente, respecto a los valores previos al fuego.

Tabla 2. Valores medios de espesor, carga y humedad de los combustibles por estrato antes del fuego en Beteta y El Pozuelo. Entre paréntesis, error estándar.

Variable	Estrato / material vegetal	Beteta	El Pozuelo
Espesor (cm)	L	1,58 (0,12)	1,10 (0,26)
	F	0,66 (0,04)	0,52 (0,14)
	H	1,54 (0,23)	0,90 (0,46)
Carga (kg m ⁻²)	L	0,24 (0,02)	0,17 (0,04)
	F	0,19 (0,01)	0,12 (0,03)
	H	0,97 (0,15)	0,49 (0,25)
Humedad de combustibles (%)	Restos leñosos finos (< 6 mm grosor)	7,4 (0,5)	8,9 (1,4)
	L	6,1 (0,7)	8,4 (1,2)
	F	6,7 (0,6)	8,9 (2,3)
	H	10,6 (0,8)	13,9 (4,5)
	Suelo mineral (0-2 cm)	14,3 (1,6)	7,5 (3,8)

Tabla 3. Temperaturas máximas (°C) alcanzadas durante el fuego en la superficie de las capas L, H, del suelo mineral y a 2 cm debajo de la superficie del suelo. Entre paréntesis, error estándar.

Posición de medida	Beteta	El Pozuelo
capa L	452 (29)	539 (20)
capa H	312 (25)	328 (11)
Suelo mineral	108 (8)	147 (24)
2 cm debajo superficie suelo	37 (2)	37 (2)

Tabla 4. Carga remanente (kg m⁻²) después del fuego de las capas L, F y H en Beteta y El Pozuelo. Entre paréntesis, error estándar.

Estrato	Beteta	El Pozuelo
capa L	0,02 (0,02)	0,01 (0,00)
capa F	0,02 (0,01)	0,00 (0,00)
capa H	0,16 (0,04)	0,11 (0,05)

La mortalidad del arbolado estuvo comprendida entre el 2 y el 26 %. La Tabla 5 recoge los valores medios del diámetro y del espesor de corteza a 0,60 m, de las temperaturas máximas alcanzadas durante el fuego en la corteza exterior y en la zona del cambium. También se indica el porcentaje de árboles en los que la temperatura máxima en el cambium fue superior a 60 °C, para cada especie de pino y cada uno de los sitios de estudio.

La Tabla 6 representa la altura media de chamuscado del tronco y el porcentaje medio del volumen de copa chamuscada para cada especie de pino y cada uno de los sitios de estudio.

Tabla 5. Diámetro y espesor de corteza a 0,60 m de la base del tronco (cm). Temperaturas máximas (°C) alcanzadas durante los fuegos experimentales en la corteza exterior y en el cambium. Media y entre paréntesis, error estándar. Porcentaje de árboles en los que la temperatura máxima en el cambium fue superior a 60 °C

Variable	Especie	Beteta	El Pozuelo
Diámetro a 0,60 m de la base del tronco (cm)	<i>P.nigra</i>	26,3 (1,6)	22,6 (2,1)
	<i>P.pinaster</i>	--	34,8 (2,4)
Espesor de la corteza a 0,60 m de la base (cm)	<i>P.nigra</i>	2,58 (0,12)	2,29 (0,15)
	<i>P.pinaster</i>	--	3,39 (0,18)
Temperatura máxima en la corteza exterior (°C)	<i>P.nigra</i>	515 (46)	568 (42)
	<i>P.pinaster</i>	--	443 (66)
Temperatura máxima en el cambium (°C)	<i>P.nigra</i>	66 (8)	82 (18)
	<i>P.pinaster</i>	--	46 (7)
Porcentaje de árboles en los que la temperatura máxima en cambium fue superior a 60 °C	<i>P.nigra</i>	49 (-)	38 (-)
	<i>P.pinaster</i>	--	7 (-)

Tabla 6. Altura de chamuscado del tronco (m) y porcentaje de volumen de copa chamuscado. Media y entre paréntesis, error estándar.

Variable	Especie	Beteta	El Pozuelo
Altura de chamuscado del tronco (m)	<i>P.nigra</i>	5,39 (0,60)	2,93 (0,29)
	<i>P.pinaster</i>	--	3,80 (0,46)
Porcentaje de volumen de copa soflamada	<i>P.nigra</i>	47 (6)	52 (8)
	<i>P.pinaster</i>	--	43 (9)

5. Discusión

Los bajos valores del contenido de humedad de las capas L y F en este estudio explican parcialmente los altos valores de consunción de los combustibles superficiales en estos fuegos experimentales realizados fuera de la ventana de prescripción. Asimismo, la alta consunción de la capa H también puede atribuirse a su bajo contenido de humedad. Estos resultados están de acuerdo con estudios previos que indican que los principales factores que determinan la consunción de hojarasca y mantillo son la carga previa al fuego y el contenido de humedad de esos combustibles (BOTELHO et al. 1994; REID et al. 2012; FERNANDES & LOUREIRO 2013; PRITCHARD et al. 2017), y en menor medida, la técnica de quema, la consunción de combustibles leñosos y la temperatura ambiente (LITTLE et al. 1986; BLACKWELL et al. 1992; BESSE et al. 2006). Elevadas tasas de consunción del humus podrían comprometer el equilibrio edáfico del sistema, además de dar lugar a elevadas emisiones de CO₂ (OTTMAR 2014).

El fuego causó daños al arbolado y al suelo con diferente grado de severidad. Los valores de consunción de la capa H indicarían una severidad del fuego en el suelo de moderada o alta, según la clasificación de severidad del fuego de NEARY et al. (2005) y KEELEY (2009). Sin embargo, estas clasificaciones combinan los daños al arbolado y suelo para establecer los diferentes niveles de severidad. No obstante, de acuerdo con una clasificación centrada más específicamente en la evaluación de las alteraciones del suelo y su cubierta orgánica (VEGA et al. 2013), el nivel de severidad del fuego en el suelo estaría en el rango bajo-moderado, ya que la capa H no fue totalmente consumida. En cuanto al arbolado, y a falta de disponer de datos definitivos de mortalidad post-fuego (que requieren alrededor de unos 3 años de observación después del fuego), el porcentaje de árboles con daño en el cambium y el volumen medio de soflamado de la copa ofrecen una información útil para una primera estimación de la severidad. En estos fuegos, la temperatura a nivel del cambium superó los 60 °C entre el 38 y el 49 % de individuos de *P.nigra*.

Esta temperatura es comúnmente aceptada como umbral de mortalidad de ese tejido (e.g. DICKINSON & JOHNSON 2004; BAUER et al. 2010). Sin embargo, en *P. pinaster*, solamente el 7 % de los individuos superó esta temperatura crítica en el cambium. Este resultado confirma el papel protector de la corteza, más gruesa en *P. pinaster* que en *P. nigra* (Tabla 5), que ha sido destacado en numerosos estudios tanto en quemadas experimentales (e.g. HENGST & DAWSON 1993; LAWES et al., 2011), como en estudios de laboratorio (e.g. ODHIAMBO et al. 2014; MADRIGAL et al. 2019). También ratifica la relativa mayor resistencia al daño en el cambium por el fuego de *P. pinaster* comparado con otros pinos del continente europeo (FERNANDES et al. 2008). Como contraste, en quemadas prescritas de baja intensidad, llevadas a cabo en primavera y otoño en la misma zona de estudio, ESPINOSA et al. (2020) refieren porcentajes bastante inferiores de individuos con temperaturas en cambium superiores a 60 °C comprendidos entre 5 y 18 %.

Los daños del fuego en el arbolado son generalmente evaluados de forma visual a partir de la estimación de la altura de chamuscado en el tronco y del porcentaje de copa soflamada (e.g. MARTINSON & OMI 2008; MOLINA et al. 2022), por su relación con la disminución del crecimiento de los árboles afectados (e.g. VALOR et al. 2015; JIMÉNEZ et al. 2017; ESPINOSA et al. 2021) y su mortalidad tras la perturbación (e.g. RYAN & REINHARDT 1996; CATRY et al. 2010; VEGA et al. 2011). Los valores de altura de chamuscado del tronco medidos en *P. nigra* son muy superiores a los alcanzados en quemadas prescritas llevadas a cabo en primavera y otoño en la misma zona de estudio (valores medios entre 0,46 y 1,67 m; ESPINOSA et al. 2021) y en otras localizaciones. Así, Vega et al. (1985) midieron alturas de chamuscado del tronco en *P. pinaster*, generalmente inferiores a 2 m en quemadas prescritas usadas operacionalmente por la DG Forestal en Galicia y VALOR et al. (2017) recogen valores medios entre 0,47 y 1,70 m en quemadas prescritas realizadas en primavera y otoño en el NE de la Península Ibérica. Sin embargo, el porcentaje de volumen de copa soflamada recogido en el presente estudio en *P. nigra*, está dentro del rango obtenido por VALOR et al. (2017), 8,7 – 67,9 %. Por lo que respecta a *P. pinaster*, tanto los valores de altura de chamuscado del tronco como los de porcentaje de copa soflamada se encuentran dentro de los rangos señalados por MOLINA et al. (2022) para quemadas prescritas realizadas en el sur de la Península Ibérica (entre 0,4 y 4,2 m y 0 y 88,3 %, respectivamente). Considerando la información relativa al daño en el cambium y en la copa del arbolado parece razonable estimar que el nivel de severidad del fuego en el arbolado resultó de moderado a alto.

Estos resultados ponen de manifiesto la relevancia de la época de quema en el efecto del fuego sobre el arbolado, y la necesidad de considerar cuidadosamente la ventana de prescripción para llevar a cabo quemadas controladas para minimizar los daños del fuego sobre la masa.

6. Conclusiones

Se concluye que el fuego ejecutado en condiciones fuera de la ventana de prescripción, representadas en este estudio por una humedad baja de la hojarasca y mantillo, y en una época de actividad vegetativa alta, puede tener un impacto negativo alto en estos pinares, incluso con velocidad de viento y de propagación del fuego bajas.

7. Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el proyecto RTA2017-00042-C05 (Vulnerabilidad integral de los sistemas forestales frente a incendios: Implicaciones en las herramientas de gestión forestal) del Programa Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación (Plan Estatal de I + D + I) cofinanciado por la Unión Europea a través del programa de fondos FEDER. La participación de Juncal Espinosa Prieto fue cofinanciada por el INIA (FPI-SGIT 2015) y el Fondo Social Europeo. Los autores dan su agradecimiento a todas las personas que colaboraron en el trabajo de campo y de laboratorio, en particular, a José Gómez, Jesús Pardo y Emilia Puga.

8. Bibliografía

- BAUER, G.; SPECK, T.; BLÖMER, J.; BERTLING, J.; SPECK, O.; 2010. Insulation capability of the bark of trees with different fire adaptation. *J Mater Sci* 45 (21), 5950–5959.
- BESSE, W.J.; BLACKWELL, B.A.; GREEN, R.N.; HAWKES, B.C.; 2006. Prescribed burning impacts on some coastal British Columbia ecosystems. British Columbia Information Report. BC-X-403, 25 p.
- BLACKWELL, B.A.; FELLER, M.C.; TROWBRIDGE, R.; 1992. Conversion of dense lodgepole pine stands in west-central British Columbia into young lodgepole pine plantations using prescribed fire. 1. Biomass consumption during burning treatments. *Can J For Res* 22: 572-581.
- BOTELHO, H.S.; VEGA, J.A.; FERNANDES, P.; REGO, F.M.C.; 1994. Prescribed fire behavior and fuel consumption in northern Portugal and Galiza maritime pine stands. Proc. 2nd Int. Conf. Forest Fire Research, Coimbra Vol. 1: 343-353.
- CATRY, F.X.; REGO, F.; MOREIRA, F.; FERNANDES, P.M.; PAUSAS, J.G.; 2010. Post-fire tree mortality in mixed forests of central Portugal. *For Ecol Manage* 260: 1184-1192.
- DICKINSON, M.B.; JONHSON, E.A.; 2004. Temperature-dependent rate models of vascular cambium cell mortality. *Can J For Res* 34 (3): 546–559.
- ESPINOSA, J.; RODRÍGUEZ de RIVERA, O.; MADRIGAL, J.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C.; 2020. Predicting potential cambium damage and fire resistance in *P.nigra* Arn. ssp. *salzmannii*. *For Ecol Manage* 474: 118372.
- ESPINOSA, J.; MARTIN-BENITO, D.; RODRÍGUEZ DE RIVERA, Ó.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; MADRIGAL, J.; 2021. Tree Growth Response to Low-Intensity Prescribed Burning in *P.nigra* Stands: Effects of Burn Season and Fire Severity. *Appl Sci* 11(16), 7462.
- FERNANDES, P.M.; LOUREIRO, C.; 2013. Fine fuels consumption and CO₂ emissions from surface fire experiments in maritime pine stands in northern Portugal. *For Ecol Manage* 291: 344-356.
- FERNANDES, P.A.; LOUREIRO, C.A.; BOTELHO, H.S.; 2004. Fire behaviour and severity in a maritime pine stand under differing fuel conditions. *Ann For Sci* 61(6): 537-544.
- FERNANDES, P.M.; VEGA, J.A.; JIMÉNEZ, E.; RIGOLOT, E.; 2008. Fire resistance of European pines. *For. Ecol. Manage.* 256: 246–255.
- FERNANDES, P.M.; BOTELHO, H.S.; REGO, F.C.; LOUREIRO, C.; 2009. Empirical modelling of surface fire behaviour in maritime pine stands. *Int J Wildland Fire* 18: 698–710.
- HENGST, G.E.; DAWSON, J.O.; 1993. Bark properties and fire resistance of selected tree species from the central hardwood region of North America. *Can J For Res* 24: 688–696.
- JIMÉNEZ, E.; VEGA, J.A.; FERNÁNDEZ, C.; 2017. Response of *Pinus pinaster* Ait. trees to controlled localised application of heat to stem and crown. *Trees* 31: 1203–1213.
- KEELEY, J.E.; 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *Int J Wildland Fire* 18(1): 116-126.

LAWES, M.J.; ADIE, H.; RUSSELL-SMITH, J.; MURPHY, B.; MIDGLEY, J.J.; 2011. How do small savanna trees avoid stem mortality by fire? The roles of stem diameter, height and bark thickness. *Ecosphere* 2(4): 1-13.

LITTLE, S.N.; OTTMAR, R.D.; OHMANN, J.L.; 1986. Predicting duff consumption from prescribed burns on conifer clearcuts in Western Oregon and Western Washington. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR. Research Paper PNW-362. 29 p.

MADRIGAL, J.; SOUTO-GARCÍA, J.; CALAMA, R.; GUIJARRO M.; PICOS, J.; HERNANDO, C.; 2019. Resistance of *P.pinea* L. bark to fire. *Int J Wildland Fire* 28 (5): 342-353.

MARTINSON, E.J.; OMI, P.N.; 2008. Assessing mitigation of wildfire severity by fuel treatments—an example from the Coastal Plain of Mississippi. *Int J Wildland Fire* 17(3): 415-420.

MOLINA, J.R.; ORTEGA, M.; RODRÍGUEZ y SILVA, F.; 2022. Scorch height and volume modelling in prescribed fires: Effects of canopy gaps in *P.pinaster* stands in Southern Europe. *For Ecol Manage* 506: 119979.

MOREIRA, F.; VIEDMA, O.; ARIANOUTSOU, M.; CURT, T.; KOUTSIAS, N.; RIGOLOT, E.; BARBATI, A.; CORONA, P.M.; VAZ P.; XANTHOPOULOS, G.; MOUILLOT, F.; BILGILI, E.; 2011. Landscape-wildfire interactions in southern Europe: implications for landscape management. *J Environ Manage* 92(10): 2389-2402.

NEARY, D.G.; RYAN, K.C.; DEBANO, L.F.; 2005. Wildland fire in ecosystems. Effects of fire on soil and water. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-323 42-vol 4. (Ogden, UT).

ODHIAMBO, B.; MEINCKEN, M.; SEIFERT, T.; 2014. The protective role of bark against fire damage: a comparative study on selected introduced and indigenous tree species in the Western Cape, South Africa. *Trees* 28 (2), 555-565.

OTTMAR, R.D.; 2014. Wildland fire emissions, carbon and climate: modelling fuel consumptions. *For Ecol Manage* 317: 41-50.

PRICHARD, S.J.; KENNEDY, M.C.; WRIGHT, C.S.; CRONAN, J.B.; OTTMAR, R.D.; 2017. Predicting forest floor and woody fuel consumption from prescribed burns in southern and western pine ecosystems of the United States. *For Ecol Manage* 405: 328-338.

REID, A.M.; ROBERTSON, K.M.; HMIELOWSKI, T.L.; 2012. Predicting litter and live herb fuel consumption during prescribed fires in native and old-field upland pine communities of the southeastern United States. *Can J For Res* 42: 1611-1622.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; GUIJARRO M.; MADRIGAL, J.; JIMÉNEZ E.; MOLINA J.R.; HERNANDO C.; VÉLEZ R.; VEGA, J.A.; 2017. Assessment of crown fire initiation and spread models in Mediterranean conifer forests by using data from field and laboratory experiments. *For Syst* 26, e02S.

RYAN, K. C.; REINHARDT, E.D.; 1988. Predicting postfire mortality of seven western conifers. *Can J For Res* 18: 1291-1297.

VALOR, T.; GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R.; PIQUÉ, M.; 2015. Assessing the impact of prescribed burning on the growth of European pines. *For Ecol Manage*. 343: 101-109.

VALOR, T.; GONZÁLEZ-OLABARRÍA, J.R.; PIQUÉ, M.; CASALS, P.; 2017. Effects of burning season and severity on the mortality over time of *P.nigra* Arnold ssp. *salzmanii* and *P. sylvestris* L. *For Ecol Manage* 406: 172-183.

VEGA, J.A.; BARÁ, S.; GIL, M.C.; 1985. Algunos efectos a corto plazo del fuego prescrito en pinares de Galicia. En: Estudios sobre prevención y efectos ecológicos de los incendios forestales. ICONA: 103-145-135

VEGA, J.A.; JIMÉNEZ, E.; VEGA, D.; ORTIZ, L.; PÉREZ, J.R.; 2011. *Pinus pinaster* Ait. tree mortality following wildfire in Spain. *For Ecol Manag* 261:2232-2242

VEGA, J.A.; FONTÚRBEL, T.; MERINO, A.; FERNÁNDEZ, C.; FERREIRO, A.; JIMÉNEZ, E.; 2013. Testing the suitability of visual indicators of soil burn severity to reflect changes in soil chemical and microbial properties in pine stands and shrublands. *Plant Soil* 369: 73-91.