

9CFE-1622

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



Organiza



Modelización de combustibles de copas en masas puras y mixtas de *Quercus ilex* y *Pinus halepensis* a partir de datos LiDAR del PNOA

<u>EVA MARINO (1, 3)</u>, STEFANO ARELLANO (1), SANTIAGO MARTÍN (1), FRANCISCO SENRA (2) y JOSÉ LUIS TOMÉ (1)

(1) Agresta Sociedad Cooperativa. C/ Duque de Fernán Núñez, 2, 1º. 28012 Madrid

(2) Agencia de Medio Ambiente y Agua, Junta de Andalucía. Calle Johan G. Gutenberg 1, 41092 Sevilla

(3) ICIFOR-INIA, CSIC. Carretera A Coruña km 7.5, 28040 Madrid **Resumen**

La utilización de datos LiDAR aéreos en la caracterización de las masas arboladas está cada vez más generalizada, suponiendo un gran avance para la cuantificación de variables forestales en grandes superficies. Estudios previos demuestran su utilidad para estimar parámetros críticos en la evaluación del riesgo de incendio y comportamiento del fuego, como la altura de base de copas (CBH), carga de combustible disponible (CFL) y densidad aparente de combustible en el dosel arbóreo (CBD). Sin embargo, faltan modelos específicos para especies arboladas mediterráneas muy representativas, en especial para frondosas, lo que dificulta su aplicación y fiabilidad. En este estudio se utilizaron modelos de regresión lineal para estimar CBH, CFL y CBD en masas puras y mixtas de Quercus ilex y Pinus halepensis a partir de datos LiDAR-PNOA. El rango de variabilidad explicada fue del 37% a 68% para CBH, 45% a 72% para CFL y 37% a 54% para CBD. En general, los resultados indicaron mejores modelos para pinares respecto a encinares y masas mixtas, aunque con errores de estimación aceptables en las masas con presencia de Q. ilex. Los resultados sirvieron para generar cartografías continuas de combustibles de copas útiles en la planificación preventiva y extinción de incendios.

Palabras clave

Altura de la base del dosel, carga de combustible disponible, densidad aparente de combustible, laser escáner aéreo, regresión lineal.

1.Introducción

Los incendios de copas son una de las principales amenazas para las masas arboladas. La acumulación de combustible derivada del abandono rural y de los usos tradicionales está modificando la estructura de los ecosistemas forestales, que unido al aumento de la interfaz urbano-forestal en el Mediterráneo está incrementando notablemente el riesgo de ocurrencia de incendios de comportamiento extremo, con graves impactos ambientales y socioeconómicos (MARINO et al. 2014). A pesar de la adaptación al fuego de algunas especies, los escenarios actuales están modificando los regímenes de fuego en muchas zonas forestales, poniendo en peligro la recuperación de los ecosistemas existentes y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos que proporcionan (PAUSAS et al. 2008).



Dentro de los ecosistemas arbolados, los pinares son los más afectadas por el fuego en España, siendo el pino carrasco (*Pinus halepensis* MillL.) la especie con mayor área incendiada que supone un promedio del 22% del total de la superficie forestal quemada (MAPA, 2019). Por otro lado, la encina (*Quercus ilex* L.) es la especie autóctona que mayor superficie ocupa en nuestro país, con casi 5 millones de ha incluyendo dehesas, siendo también la frondosa autóctona más afectada por los incendios forestales (MAPA, 2019).

La planificación preventiva, enfocada tanto al aumento de la resiliencia de ecosistemas forestales afectados por el fuego como a la mejora de la eficacia de los operativos de extinción, requiere de cartografías de los combustibles forestales que permitan conocer con detalle su distribución, incluyendo una cuantificación a nivel espacial. Esta información es clave para la utilización de herramientas de simulación de incendios, que permitan anticipar el comportamiento potencial del fuego en función de una caracterización precisa de la estructura de las masas arboladas (ALCASENA et al. 2015).

La utilización de datos LiDAR aéreos para la caracterización de ecosistemas arbolados está cada vez más generalizada, suponiendo un gran avance para la cuantificación de variables forestales en grandes superficies (RIAÑO et al. 2003; ANDERSEN et al. 2005; HUDAK et al. 2008). Estudios previos demuestran su utilidad para estimar parámetros críticos en la evaluación del riesgo de incendio y comportamiento del fuego, como son la altura de la base de las copas (CBH), la carga de combustible disponible (CFL) y la densidad aparente de combustible en el dosel arbóreo (CBD) (VAN WAGNER, 1977; CRUZ et al., 2003; SENRA et al. 2012; FERNÁNDEZ-ALONSO et al., 2013; MOLINA et al., 2014).

Hasta la fecha, las principales masas arboladas analizadas con datos LiDAR aéreos incluyen especies de coníferas norteamericanas y europeas generalmente representativas de bosques templados (ANDERSEN et al. 2005, RIAÑO et al. 2003; GONZÁLEZ-OLABARRIA et al, 2012; GONZÁLEZ-FERREIRO et al. 2014, 2017; CHAMBERLAIN et al. 2021; ALONSO-REGO et al., 2021). Existen algunos estudios en especies de arbolado mediterráneas, la mayoría basados en datos de campo recogidos en áreas de pequeña superficie (ZALDO et al. 2010; BOTEQUIM et al, 2019; FERRER PALOMINO y RODRÍGUEZ Y SILVA, 2021; RUIZ et al. 2021), lo que limita su transferibilidad a la hora de extrapolar su utilización en distintas condiciones (MARINO et al. 2022a). Para la aplicación de modelos de estimación de variables de copas a gran escala (ej. regional) es necesario obtener modelos específicos robustos que garanticen suficientemente la precisión de las variables del combustible en un amplio rango de características estructurales de las masas arboladas. En consecuencia, todavía faltan modelos de estimación de los combustibles de copas para numerosas especies arboladas representativas del entorno mediterráneo, en especial para frondosas, lo que dificulta su aplicación y fiabilidad. La disponibilidad de datos LiDAR con cobertura estatal del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) supone una oportunidad para mejorar estas cartografías de combustibles de copas en las masas arboladas de nuestro territorio.

2.Objetivos

FORESTAL ESPAÑOL 2025 | 16-20

GIJÓN JUNIC

El objetivo de este estudio fue explorar la capacidad de los datos LiDAR de baja densidad para caracterizar la estructura de los combustibles de copas en grandes superficies considerando la heterogeneidad espacial de las masas arboladas. Para ello, se exploraron modelos de regresión lineal para estimar CBH, CFL y CBD a partir de datos LiDAR-PNOA en dos especies muy representativas del entorno mediterráneo, en concreto para masas puras y mixtas de *Quercus ilex* y *Pinus halepensis*, comparando los resultados obtenidos en función del tipo de vegetación arbolada.

3.Metodología

3.1. ÁreaArea de estudio y datos de campo

La zona de estudio seleccionada comprende las áreas forestales de Andalucía dominadas por masas puras de encina (*Quercus ilex*), pino carrasco (*Pinus halepensis*) o una mezcla de ambas como especies dominantes (masas mixtas), considerando un mínimo de 25% de cobertura relativa de la segunda especie en el caso de las masas mixtas. Estas masas ocupan una extensión de más del 50% del total de la superficie forestal arbolada de la comunidad autónoma andaluza.

En estas formaciones arboladas se seleccionaron un total de 222 parcelas considerando la ocupación y heterogeneidad estructural existente para cada especie (*Tabla 1*). El rango de variabilidad estructural de cada tipo de formación se evaluó en gabinete a partir de los datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3, MARM, 2008) y capas raster derivadas de datos los LiDAR, considerando la fracción de cabida cubierta (FCC), la altura (H) y el índice *canopy relief ratio* (CRR).

Formación arbolada	Superficie ocupada (ha)	Parcelas de campo
Quercus ilex	1.218.082	92
Pinus halepensis	241.798	78
Masas mixtas	47.254	52
Total	1.507.134	222

Tabla 1. Superficie ocupada en Andalucía por cada tipo de formación arbolada y número de parcelas seleccionadas en el diseño de inventario

Los centros de las parcelas se localizaron con GPS submétrico para la adecuada comparación de los datos de campo con las métricas LiDAR. Los inventarios se realizaron en parcelas circulares de 11,3 m de radio, equivalentes a un píxelpixel de 20 m en la generación de cartografías ráster de variables de copas posteriormente realizada. En cada parcela se midió el diámetro normal de todos



los pies mayores de 7,5 cm. Estos datos se emplearon para calcular la biomasa en las copas a partir de ecuaciones alométricas existentes para cada especie (MONTERO et al. 2005). La carga de combustible disponible del dosel (CFL, kg/m²) se calculó considerando tanto la biomasa foliar como las ramillas finas. La altura total y de la base de la copa se calculó en cuatro árboles representativos por parcela, seleccionando un árbol en cada sector o cuadrante de la parcela circular para caracterizar la altura media de la base de las copas (CBH, m). La densidad aparente del combustible en las copas a nivel de parcela (CBD, kg/m³) se calculó a partir de CFL y el promedio de la longitud de copas (LC), estimando LC como la diferencia entre la altura de la masa (H) y la base de copas del dosel (CBH).

3.2.Datos LiDAR

Los datos LIDAR utilizados corresponden a la segunda cobertura del PNOA, adquiridos en vuelos realizados en Andalucía entre los años 2020 y 2021 con una densidad de pulso de 1,5 p/m². Las nubes de puntos proporcionadas en formato LAZ fueron procesadas con el software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014) mediante el paquete lidR (ROUSSEL et al. 2020) y el software QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2014). Los puntos clasificados como retornos del suelo fueron empleados para generar un modelo digital del terreno (MDT) con una resolución de 2 m. Los puntos clasificados como retornos de vegetación fueron normalizados con el MDT para obtener las alturas sobre el suelo.

Se calcularon un conjunto de métricas para explorar su correlación con la estructura de las masas arboladas estudiadas (Tabla 2), probando diferentes umbrales de procesado (0.5 m, 2 m y 4 m). Estas métricas LiDAR fueron extraídas de los cortes de las nubes de puntos a nivel de parcela para comparar con las mediciones de campo. Algunas métricas se calcularon también en toda la zona de estudio, generando capas ráster con una resolución espacial de 20 m. Estas capas ráster se utilizaron para caracterizar la estructura de las masas arboladas antes de los inventarios de campo (ver metodología descrita anteriormente), considerando FCC (porcentaje de primeros retornos por encima de 2 m), H (percentil 95 de las alturas de los retornos) y CRR (canopy relief ratio) calculadas para el umbral de 2 m. Una vez obtenidos los mejores modelos de regresión para cada variable (CBH, CFL y CBD) y tipo de formación arbolada (masas puras de Q. ilex, de P. halepensis y masas mixtas), las métricas seleccionadas como variables predictoras en los modelos de estimación se obtuvieron en formato ráster de 20 m para poder generar posteriormente cartografías continuas de alta resolución de los combustibles de copas en las masas arboladas de estas especies en Andalucía.

Metric				Description	
zmin	t	Altura mínima de los retornos para el umbral	t		
zmax	t	Altura máxima de los retornos para el umbral	t		

Table 2. Métricas LiDAR analizadas como potenciales variables predictoras en los modelos de regresión, extraídas para diferentes umbrales (t = 0,5 m, 2m y 4m)

MT 6: FUEGO Y OTROS RIESGOS ABIÓTICOS



zmean	t	Altura media de los retornos para el umbral	t							
zmode	t	Moda de las alturas de los retornos para el umbral	t							
zvar	t	Varianza de las alturas de los retornos para el umbral	t							
zsd	t	Desviación estándar de las alturas de los retornos para el umbral	t							
ZCV	t	Coeficiente de variación de las alturas de los retornos para el umbral	t							
ziq	t	Rango intercuartílico de las alturas de los retornos para el umbral	t							
zskew	t	Asimetría de las alturas de los retornos para el umbral	t							
zkurt	t	Curtosis de las alturas de los retornos para el umbral	t							
pfr	t	Porcentaje de primeros retornos por encima del umbral	t							
par	t	Porcentaje de todos los retornos por encima del umbral	t							
pfrabmn	t			Porcentaje	de primeros retorno	os po	r encima	ı de la	media	
parabmn	t	Porcentaje de todos los retornos por encima de la media para el umbral	t							
pfrabmo	t	Porcentaje de primeros retornos por encima de la moda para el umbral	t							
parabmo	t	Porcentaje de todos los retornos por encima de la moda para el umbral	t							
crr	t	Canopy relief ratio		para el umbral	t					
р	i	Percentiles	i		de las alturas de los retornos		(i		= 1, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95, 99)

\bigcirc
9º CONGRESO Forestal español
2025 16-20 GIJÓN JUNIO

PRN 5	Porcentaje de retornos normalizados en el tramo	s	de alturas	(S	= 1-2, 2-3, 3-4 4-6, 6-8, 8-10, 10-12, 12-16, 16-20, 20-30, 30-50)
-------	--	---	------------	---	---	--

4.Resultados

Las formaciones estudiadas presentaron una gran variabilidad estructural en la zona de estudio (*Tabla 3*). En relación a los valores promedio de las variables de copas analizadas, los pinares de carrasco presentaron mayores alturas de base de las copas mientras que los valores medios más bajos de esta variable se observaron en las masas mixtas. La carga de combustible del dosel fue menor en los encinares, seguida de las masas mixtas, siendo los pinares las formaciones con mayores carga. Sin embargo, para la densidad aparente de combustible se observaron valores más parecidos entre las masas de ambas especies, aunque con una ligera menor variabilidad en las masas mixtas en comparación con las masas puras.

Tabla 3. Características estructurales (media y desviación estándar) observada en las parcelas de campo para cada formación arbolada (n = número de parcelas). D = diámetro normal; H = altura de la masa; LC = longitud de copa; CBH = altura de la base de las copas; CFL = Carga de combustible disponible en copas; CBD = densidad aparente de combustible en copas



Formación arbolada					LC	СВН	CFL	(kg/m2)	CBD	(kg/m3)
Quercus ilex	25.54	6.88	4.97	1.91	0.81		0.17			
(n=92)	(11.77)	(1.90)	(1.61)	(0.68)	(0.65)		(0.13)			
Pinus halepensis	25.88	10.80	8.45	2.34	1.32		0.16			
(n=78)	(8.96)	(4.54)	(3.08)	(2.10)	(0.86)		(0.10)			
Masas mixtas	23.08	8.19	6.67	1.52	1.19		0.18			
(n=52)	(6.17)	(2.25)	(1.93)	(0.83)	(0.59)		(0.07)			



El análisis de regresión mostró una correlación lineal significativa entre las métricas LiDAR y las características estructurales de las copas (*Tabla 4*). El rango de variabilidad explicada por los modelos de estimación obtenidos varió en función del tipo de variable y formación arbolada, siendo del 37% al 68% para CBH, del 45% al 72% para CFL y del 37% al 54% para CBD.

En el caso de la altura de la base de las copas, se observaron mejores resultados para la estimación de CBH en los pinares que en los encinares y las masas mixtas, aunque con un mayor nivel de error (*Tabla 4*). En general, los modelos de regresión para las formaciones arboladas con presencia de encina tendieron a sobreestimar las alturas de la base de las copas más bajas, concretamente para valores de CBH por debajo de 1,3 m en masas puras de *Q.ilex* y CBH por debajo de 0,8 m en masas mixtas (*Figura 1 y 2*).

Para la carga de combustible disponible, se encontraron mejores modelos de regresión para pinares, con R^2 similares tanto en masas puras como mixtas (*Tabla 4*). Sin embargo, el error de estimación de CFL fue menor en las masas mixtas que en las masas puras, encontrando peores resultados en los encinares (*Figura 1 y 3*).

Respecto a la densidad aparente del combustible en el dosel, se observaron mejores resultados para las masas puras de pinar que para los encinares y las masas mixtas, mostrando estas dos últimas R^2 parecidos aunque con un porcentaje de error menor en las masas mixtas (*Tabla 4*). Aunque la amplitud del rango de variabilidad fue similar en los tres tipos de formaciones, en general las masas mixtas mostraron valores más altos de CBD tanto en los valores observados como estimados por los modelos (*Figura 1 y 3*).

Tabla 4. Estadísticos de ajuste de los modelos de regresión lineal obtenidos para cada tipo de formación arbolada (n = número de parcelas). R² = coeficiente de determinación; RMSE = raíz del error medio cuadrático; MAE = error medio absoluto; MAPE = porcentaje de error medio absoluto

Variabl e estimad a	Estadíst icos	Quercu s ilex	(n=92)	Pinus halepen sis				(n=52)
СВН	R	2	0.503	0.679				0.374
RMSE (m)	0.40	0.86					0.53	
MAE (m)	0.30	0.68					0.43	
MAPE (%)	19.51	70.52					65.31	
Métrica s	р	10	zmn	02	р	5	zvar 2	p 40
CFL	R	2	0.450	0.716				0.712
RMSE (kg/m	2)	0.34	0.38				0.27



MAE (kg/m	2)	0.27	0.28					0.23				
MAPE (%)	57.39	39.83					2	23.30					
Métrica s	р	70	crr	2	pfr	02	crr	2	р	50		pfr	02
CBD	R	2	0.374	0.542					0.390				
RMSE (kg/m	3)	0.07	0.04					0.06				
MAE (kg/m	3)	0.05	0.03					0.04				
MAPE (%)	54.58	39.28					3	35.21					
Métrica s	parabm n	crr	2	pfr	2	crr	2	р	50	1	parab	2	

Figura 1. Rango de valores observados (verde) y estimados a partir de LiDAR (rojo) en cada formación arbolada. Qi, masas puras de Q. ilex (n=92); Ph, masas puras de P. halepensis (n=78); Qi+Ph, masas mixtas (n=52).





















regresión múltiple con formulación exponencial con R² de 0,82 para datos LiDAR del PNOA de la primera cobertura (0.5 p/m²). Los mismos autores encontraron un modelo de regresión con una formulación similar pero peores resultados (R^2 = 0,59) en masa mixta de Quercus con ambas especies de pinos (P. halepensis y P. *pinaster*). Estos valores de R^2 son superiores a los encontrados en el presente trabajo para masas puras de *P. halepensis* ($R^2 = 0,68$) y mixtas con *Q. ilex* ($R^2 = 0,37$), sin embargo dichos autores no reportaron los niveles de error ni el número de parcelas utilizadas en su estudio. En Cataluña, ZALDO et al. (2010) utilizaron datos LiDAR de baja densidad (0.5 p/m^2) para estimar CBH en masas puras de *Q.ilex* (n=14) y P. halepensis (n=18) obteniendo valores de R² de 0.57 y 0.66, respectivamente, con RMSE de 0.9 m en ambas especies. Para CBD y considerando solo la biomasa foliar, estos mismos autores reportaron un R² de 0,48 y RMSE de 2,5 kg/m² para la encina, mientras que para el pino carrasco obtuvieron un R² de 0,59 y RMSE de 2,1 kg/m². Con una mayor densidad de pulsos (14 p/m²) obtenida a partir de LiDAR de onda completa, RUIZ et al. (2021) obtuvieron un modelo CBH mediante regresión lineal múltiple con R² de 0,91 y RMSE de 0,88 m (n=80) en masas dominadas por P. halepensis, P. pinaster y mixtas con Quercus suber de la sierra de Espadán, Valencia. En ese mismo estudio, los autores obtuvieron para CFL un R² de 0,78 y RMSE de 0,38 kg/m², ligeramente superior al encontrado en el presente trabajo a nivel de ajuste del modelo de regresión pero no a nivel de error, tanto para masas puras andaluzas de *P. halepensis* (R² = 0,72 y RMSE = 0.38 kg/m²) como mixtas de *Q. ilex* y *P. halepensis* (R² = 0.71 y RMSE = 0.27 kg/m²). Este resultado es bastante relevante, dada la baja densidad LiDAR de la segunda cobertura del PNOA en AndalucíaAndalucia (1,5 p/m²) en comparación con la proporcionada por el LiDAR de onda completa utilizado por RUIZ et al. (2021). Esa tecnología aún no está disponible para la obtención de datos en grandes superficies, y requiere además un procesado más complejo por el gran volumen de datos que proporciona. No obstante, el potencial del LiDAR de onda completa sobre los datos del PNOA está fundamental en la caracterización del combustible del sotobosque, que se ve limitada por la oclusión del doseldosél arbóreo en masas arboladas más densas (RUIZ et al. 2021). En cuanto a CBD, hasta la fecha no se conocen estudios previos para masas puras ni mixtas de las especies mediterráneas estudiadas.



Los modelos de regresión lineal para la estimación de CBH, CFL y CBD a partir de LiDAR del PNOA encontrados en el presente estudio para pinares de P. halepensis muestran mejores valores de R² (entre 0.54 y 0.72) en comparación con las masas de encina (R² entre 0.37 y 0.50) y las masas mixtas con mezcla de pino y encina (R² entre 0.39 y 0.71). Los resultados obtenidos para las masas puras de Q. ilex mejoraron el nivel de ajuste en las tres variables estudiadas (CBH, CFL y CBD) al aumentar el número de la muestra (n=92) respecto a los resultados previos observados (n=41) en la misma zona de estudio (MARINO et al. 2022b). Sin embargo, para las masas puras de pino carrasco se encontraron peores resultados con un número significativamente mayor de datos de campo (n=78) que los reportados en los modelos preliminares con pocas parcelas (n=18) y que tenían una menor variabilidad estructural (MARINO et al. 2022b). Este resultado pone de manifiesto que, a la hora de aplicar modelos disponibles en la bibliografía, es importante tener en cuenta no solo la bondad del ajuste y niveles de errores reportados, sino también el tamaño y variabilidad estructural de la muestra de parcelas utilizada en esos trabajos.

Además de las consideraciones sobre los datos de ajuste, la distinta densidad de pulsos (p/m²) es otro factor relevante a la hora de garantizar estimaciones fiables en la extrapolación de modelos existentes para la generación de cartografías de combustibles de copas a partir de datos LiDAR. En un estudio previo de transferibilidad se demostró que los errores pueden ser significativos al aplicar los modelos de estimación de CBH, CFL y CBD con datos LiDAR distintos, tanto con menor como con mayor densidad de p/m², incluso para la misma especie y parcelas de estudio (MARINO et al. 2022a). Por tanto, se debe tener precaución a la hora de extrapolar directamente este tipo de modelos para la obtención de cartografías de combustibles de copas, no sólo para especies o zonas de estudio distintas a las empleadas en su obtención, sino también cuando las características de los datos LiDAR no sean similares a los utilizados en la calibración de esos modelos. Esto pone de relevancia la necesidad de seguir trabajando en la modelización específica adaptada no sólo a las especies arboladas sino a las nuevas características de los futuros vuelos LiDAR con el fin de garantizar la mayor fiabilidad posible en las cartografías, que son inputs necesarios para la utilización de herramientas de simulación del comportamiento potencial del fuego por parte de los servicios de prevención y extinción de incendios. En España, la primera cobertura LiDAR del PNOA (2008-2015) se realizó con una densidad homogénea de 0.5 p/m². Actualmente se dispone de la segunda cobertura del PNOA (2015-2021) con una densidad variable según las comunidades autónomas (0.5 a 14 p/m²), estando en curso la tercera cobertura (2021-2025) que de nuevo se va a capturar con densidad homogénea para todo el país de 5 puntos por m², lo cual va a facilitar la calibración v extrapolación de este tipo de modelos para la caracterización estructural del combustible en las masas arboladas dentro del territorio nacional.

6.Conclusiones

Los resultados de este estudio indicaron en general mejores modelos de estimación a partir de datos LiDAR aéreo de baja densidad (1,5 p/m²) para las



masas de pinares de *P. halepensis* en comparación con encinares y masas mixtas de ambas especies, aunque con errores de estimación aceptables en las masas con presencia de *Q. ilex.* Los modelos obtenidos sirvieron para generar cartografías continuas de combustibles de copas útiles en la planificación preventiva y extinción de incendios, suponiendo una fuente de información indispensable para los gestores del territorio responsables de los incendios forestales. Este trabajo es parte de un proyecto más amplio de caracterización de combustibles en Andalucía (proyecto CILIFO), en el que se han generado cartografías de los combustibles forestales a escala regional con datos LiDAR del PNOA a partir de modelos específicos obtenidos para las principales formaciones arboladas existentes.

7.Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el servicio "NET872330 – Modelización del combustible forestal" dentro del marco del proyecto CILIFO (Centro Ibérico para la Investigación y Lucha contra Incendios Forestales), cofinanciado por la Junta de Andalucía y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER dentro del programa Interreg V A España – Portugal (POCTEP) 2014-2020 de la Unión Europea. Stéfano Arellano ha recibido financiación parcial mediante la ayuda PTQ2021-012150 (MCIN/AEI/10.13039/501100011033). Los autores agradecen especialmente a Francisco J. Castelló de la Junta de Andalucía, así como a todas las personas que colaboraron en la ejecución del servicio NET872330 en el marco del proyecto CILIFO.

8.Bibliografía

ALCASENA, F.J.; SALIS, M.; AGER, A.A.; ARCA, B.; MOLINA-TERREN, D.; SPANO, D. 2015. Assessing Landscape Scale Wildfire Exposure for Highly Valued Resources in a Mediterranean Area. *Environ. Manag.* 55, 1200–1216.

ALONSO-REGO, C., ARELLANO-PÉREZ, S., GUERRA-HERNÁNDEZ, J., MOLINA-VALERO, J. A., MARTÍNEZ-CALVO, A., PÉREZ-CRUZADO, C., CASTEDO-DORADO, F., GONZÁLEZ-FERREIRO, E., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G., RUIZ-GONZÁLEZ, A. D. 2021. Estimating Stand and Fire-Related Surface and Canopy Fuel Variables in Pine Stands Using Low-Density Airborne and Single-Scan Terrestrial Laser Scanning Data. *Remote Sens.* 13, 5170.

ANDERSEN, H.E.; McGAUGUGHEY, R.J.; REUTEBUCH, S.E. 2005. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sens. Environ.* 94, 441–449.

BOTEQUIM, B.; FERNANDES, P. M.; BORGES, J. G.; GONZALEZ-FERREIRO, E.; GUERRA-HERNANDEZ, J. 2019. Improving silvicultural practices for Mediterranean forests through fire behaviour modelling using LiDAR-derived canopy fuel characteristics. *Int. J. Wildland Fire* 28(11), 823–839.

CHAMBERLAIN, C. P.; SÁNCHEZ MEADOR, A. J.; THODE, A. E. 2021. Airborne lidar



provides reliable estimates of canopy base height and canopy bulk density in southwestern ponderosa pine forests. *For. Ecol. Manage.* 481.

CRUZ, M. G.; ALEXANDER, M. E.; WAKIMOTO, R. H. 2003. Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America. *Int. J. Wildland Fire*, 12(1), 39–50.

FERNÁNDEZ-ALONSO, J. M.; ALBERDI, I.; ÁLVAREZ-GONZALEZ, J. G.; VEGA, J. A.; CAÑELLAS, I.; RUIZ-GONZALEZ, A. D. 2013. Canopy fuel characteristics in relation to crown fire potential in pine stands: Analysis, modelling and classification. *Eur. J. For. Res.* 132(2), 363–377.

FERRER-PALOMINO, A.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F. 2021. Fuel Modelling Characterisation Using Low - Density LiDAR in the Mediterranean: An Application to a Natural Protected Area. *Forests*, 12, 1011.

FIDALGO-GONZÁLEZ, L.A; ARELLANO-PÉREZ, S.; ÁLVAREZ-GONZALEZ, J. G., CASTEDO-DORADO, F.; RUIZ-GONZALEZ, A. D.; GONZALEZ-FERREIRO, E. 2019. Estimación de la distribución vertical de combustibles finos del dosel de copas en masas de *Pinus sylvestris* empleando datos LiDAR de baja densidad. *Rev. Teledetección* 53, 1-16

GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; DIEGUEZ-ARANDA, U.; CRECENTE-CAMPO, F.; BARREIRO-FERNÁNDEZ, L.; MIRANDA, D.; CASTEDO-DORADO, F.; 2014. Modelling canopy fuel variables for Pinus radiata D. Don in NW Spain with low-density LiDAR data. *Int. J. Wildland Fire* 23, 350–362.

GONZALEZ-FERREIRO, E.; ARELLANO-PÉREZ, S.; CASTEDO-DORADO, F.; HEVIA, A.; VEGA, J. A.; VEGA-NIEVA, D.; ÁLVAREZ-GONZALEZ, J. G.; RUIZ-GONZALEZ, A. D. 2017. Modelling the vertical distribution of canopy fuel load using national forest inventory and low-density airbone laser scanning data. *PLoS ONE* 12(4), 1–21.

GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R.; RODRÍGUEZ, F.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; MOLA-YUDEGO, B. 2012. Mapping fire risk in the model forest of Urbión (Spain) based on airborne LiDAR measurements. *For. Ecol. Manag.* 282, 149–156.

HUDAK, A.T.; CROOKSTON, N.L.; EVANS, J.S.; HALL, D.E.; FALKOWSKI, M.J. 2008. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sens. Environ.* 112, 2232–2245.

MAPA. 2019. Los incendios forestales en España. Decenio 2006-2015. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación Secretaría General Técnica Impresión, Madrid. 166 p.



MARINO, E.; HERNANDO, C.; MADRIGAL, J.; GUIJARRO, M. 2014. Forest fuel management for wildfire prevention in Spain: a quantitative SWOT analysis. *Int. J. Wildland Fire* 23(3), 373-384.

MARINO, E.; TOMÉ, J.L.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; MADRIGAL, J. 2022a. Transferability of airborne LiDAR data for canopy fuel mapping: effect of pulse density and model formulation. *Fire* 5, 126.

MARINO, E.; ARELLANO-PÉREZ, S.; MARTÍN-ALCÓN, S.; TOMÉ, J.L. 2022b. Canopy fuel modelling in Mediterranean forest stands with airborne LiDAR data at regional scale: preliminary results. IX International Conference on Forest Fire Research, Coimbra (Portugal), 11-18 noviembre 2022.

MARM. 2008. Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) 1997-2007. Andalucía. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO2 por los bosques españoles. Monografías INIA: Serie Forestal. No 13 (F013).

MOLINA, J. R.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MÉRIDA, E.; HERRERA, M. Á. 2014. Modelling available crown fuel for Pinus pinaster Ait . stands in the " Cazorla , Segura and Las Villas Natural Park " (Spain). *J. Environ. Manage.* 144, 26–33.

PAUSAS, J.; LLOVET, J.; RODRIGO, A.; VALLEJO, R. 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? A review. *Int. J. Wildland Fire* 17, 713–723.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. 2014. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. URL: http://qgis.osgeo.org/.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RIAÑO, D.; MEIER, E.; ALLGOWER, B.; CHUVIECO, E.; USTIN, S.L. 2003. Modelling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behaviour modelling. *Remote Sens. Environ.* 86 (2), 177-186.

ROUSSEL, J.R.; AUTY, D.; COOPS, N. C.; TOMPALSKI, P.; GOODBODY, T. R. H.; SÁNCHEZ MEADOR, A.; BOURDON, J.F.; DE BOISSIEU, F.; ACHIM, A. 2020. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sens. Environ.* 251, 112061.

RUIZ, L. Á.; CRESPO-PEREMARCH, P; TORRALBA, J. 2021. Modelling canopy fuel



properties and understory vegetation with full-waveform LiDAR. Proceedings of the International Conference on Smart Geoinformatics Applications (ICSGA 2021), Prince of Songkla University, Phuket, Thailand.

SENRA RIVERO, F. 2012. Mantenimiento de sistemas lineales preventivos de defensa contra incendios en áreas forestales mediterráneas mediante la aplicación de quemas prescritas. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba.

VAN WAGNER, C. E. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Can. J. For. Res.* 7(1), 23–34.

ZALDO, V.; MORÉ, G.; PONS, X. 2010. Estimación y cartografía de parámetros ecológicos y forestales en tres especies (*Quercus ilex* L. *subsp ilex*, *Fagus sylvatica* L. y *Pinus halepensis* L.) con datos LiDAR. *Rev. Teledetección* 34: 55-68.