



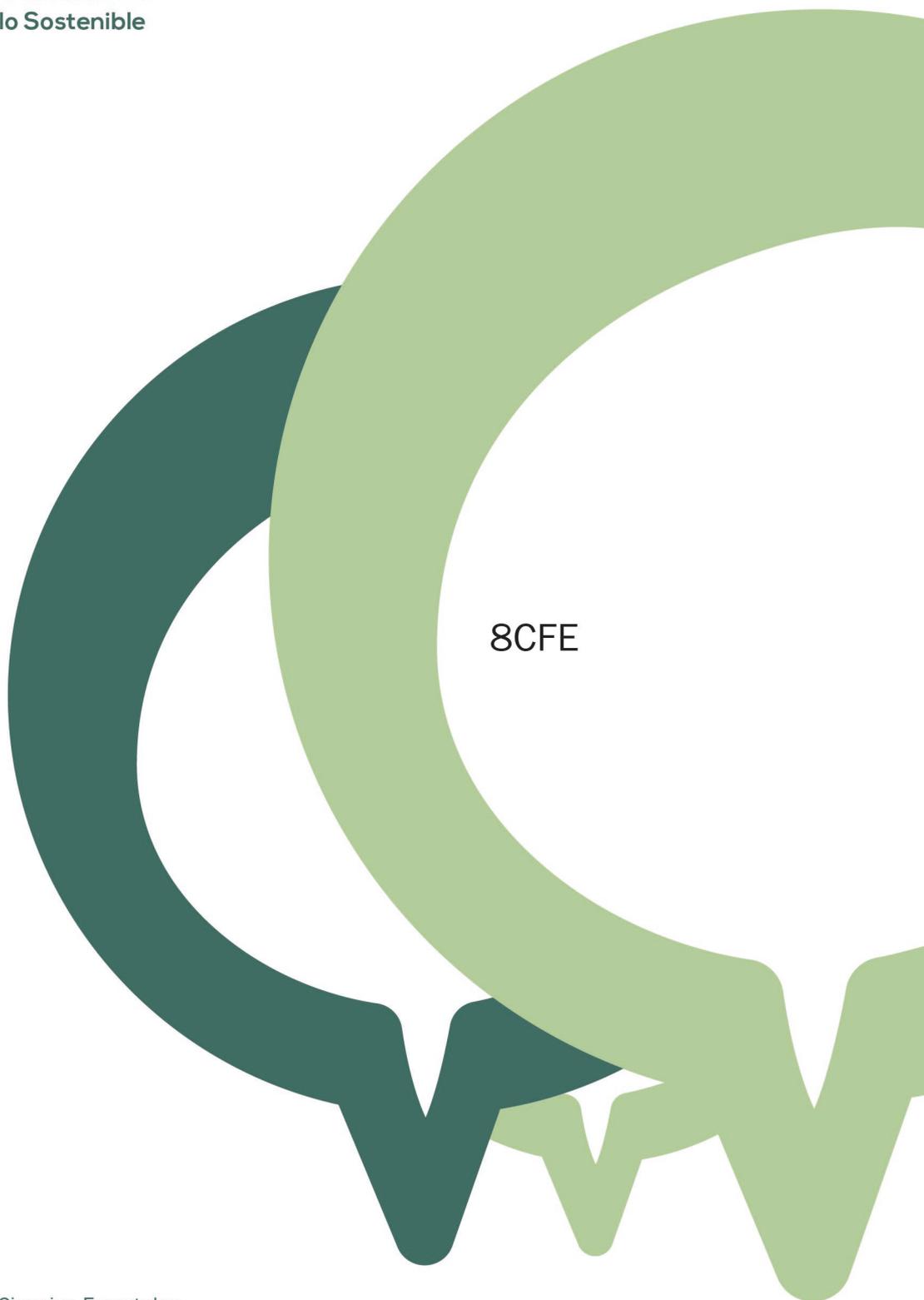
2022  
Lleida

27·1  
junio · juny  
julio · juliol

Cataluña  
Catalunya

## 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



## Caracterización y modelización de combustibles forestales en Andalucía: generación de cartografías de alta resolución e integración en la plataforma SIPNA en el marco del proyecto CILIFO

MARINO DEL AMO, E.<sup>1</sup>, ARELLANO PÉREZ, S.<sup>1</sup>, TOMÉ MORÁN, J.L.<sup>1</sup>, MARTÍN ALCÓN, S.<sup>1</sup>, LOBO SÁNCHEZ, A.<sup>1</sup>, RODRÍGUEZ Y SILVA, F.<sup>2</sup>, ROMERO ROMERO, D.<sup>3</sup>, ROMERO MORATO, A.<sup>3</sup>, SENRA RIVERO, F.<sup>4</sup> y CASTELLÓ PALAZÓN, F.J.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> AGRESTA Sociedad Cooperativa.

<sup>2</sup> ETSIAM, Universidad de Córdoba.

<sup>3</sup> RQUER Tecnología y Sistemas, S.L.

<sup>4</sup> INFOCA, Agencia de Medio Ambiente y Agua, Junta de Andalucía.

### Resumen

Las cartografías de alta resolución de los combustibles forestales se han convertido en una información espacial imprescindible para la simulación de incendios, herramienta básica tanto para la gestión preventiva como para la extinción. La generación y actualización de estas cartografías a escala regional supone un importante reto para las administraciones públicas al requerir no solo información detallada de la vegetación existente en todo el territorio en relación a su estructura y comportamiento potencial frente al fuego, sino a la necesidad de disponer de mecanismos ágiles de actualización de estos complejos de combustible. En el marco del proyecto CILIFO se está desarrollando una mejora de la caracterización de los combustibles superficiales y arbóreos presentes en la comunidad autónoma de Andalucía. Este trabajo incorpora tanto la generación de cartografías de calidad de modelos de combustible (clasificación UCO40 y Rothermel) y de combustibles de copas (altura de base de copa, carga disponible y densidad aparente) basadas en datos LIDAR del PNOA y datos de campo, como una herramienta para su revisión, actualización e integración en la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) a través del "Módulo Seguimiento" de la plataforma SIPNA (Sistema de Información del Patrimonio Natural de Andalucía).

### Palabras clave

Cartografía de combustibles, modelización de combustibles, LiDAR PNOA, prevención de incendios, gestión de incendios.

## 1. Introducción

Los incendios forestales son una de las principales perturbaciones que afectan a los ecosistemas, con efectos de gran impacto a nivel medioambiental, económico y social. Las cartografías de alta resolución de los combustibles forestales se han convertido en una información espacial imprescindible para la simulación de incendios, herramienta básica tanto para la gestión preventiva de los incendios forestales como para su extinción. La generación y actualización de estas cartografías a escala regional supone un importante reto para las administraciones públicas al requerir no solo información detallada de la vegetación existente en todo el territorio en relación a su estructura y comportamiento potencial frente al fuego, sino a la necesidad de disponer de mecanismos ágiles de actualización de estos complejos de combustible.

La Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) integra toda la información sobre el medio ambiente en Andalucía, constituyendo así una fuente de datos única con el fin de proporcionar a los usuarios información centralizada sobre el territorio para su uso en la planificación y gestión de actuaciones ambientales. Dentro de REDIAM, la plataforma SIPNA (Sistema de Información sobre el Patrimonio Natural de Andalucía) reúne a escala detalle (1:10.000) información geográfica y alfanumérica de los hábitats, la vegetación, la biogeografía, los usos y la ocupación del suelo,

procedente de la integración de una serie de capas, entre ellas el proyecto SIOSE Andalucía, los Hábitats de Interés Comunitario (HIC), y la cartografía de vegetación en ecosistemas forestales de Andalucía (VEGE10). SIPNA constituye una herramienta básica para la gestión, abordando, en una misma plataforma y con un modelo de datos común, todos los aspectos relacionados con la caracterización y seguimiento del territorio andaluz desde el punto de vista biológico (ROMERO et al., 2018). El nuevo modelo SIPNA incorpora además la dimensión temporal, convirtiendo la información asociada al objeto geográfico en un evento.

La constante evolución de la vegetación en un contexto de incendios requiere de la actualización de la cartografía del combustible forestal para su consulta e implementación en los simuladores del comportamiento del fuego así como para los estudios técnicos sobre el análisis y seguimiento de los incendios forestales. En Andalucía, la actual información espacial de la distribución de los modelos de combustible forestal está obsoleta, y dado que aún no está vinculada a las mejoras relacionadas con la información ambiental disponible, su actualización periódica implica una gran inversión en recursos de monitorización dada la gran superficie a abordar. Además, las metodologías de elaboración de las cartografías regionales actuales presentan limitaciones en la caracterización de determinadas estructuras arbóreas y matorral bajo dosel de copas dado que están basadas en fotointerpretación y los usos de ocupación del suelo, que tienen una capacidad limitada para proporcionar información tridimensional de la distribución espacial de la vegetación. Por otro lado, la estructura del estrato arbóreo juega un papel crítico en la propagación de los incendios forestales, condicionando el comportamiento del fuego y el tipo de incendio esperado (fuego de superficie, de copas pasivo o de copas activo). La generación de cartografías de alta resolución que incorporen información sobre los diferentes descriptores del estrato arbóreo es indispensable para el análisis del comportamiento esperado de los incendios mediante el uso de simuladores del comportamiento del fuego. En este sentido, la integración de la información ambiental previa existente a escala regional con datos disponibles de otras fuentes, en especial LiDAR aéreo y teledetección satelital, suponen una oportunidad para mejorar la caracterización de los complejos de combustible forestal a gran escala y con un alto nivel de detalle (MARINO et al. 2016).

## 2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es la generación de una cartografía de calidad de los modelos de combustible superficial y del estrato arbóreo de Andalucía así como su inclusión en la plataforma SIPNA, a través del “Módulo Seguimiento”, que facilite su revisión, actualización e integración en REDIAM. El presente proyecto se enmarca dentro del servicio NET872330 – MODELIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE FORESTAL EN EL MARCO DEL PROYECTO CILIFO que consta de dos lotes o fases con objetivos específicos:

- **Fase 1. Cartografía y modelado del combustible forestal de Andalucía e integrabilidad en la plataforma SIPNA.** El objetivo de esta primera fase es generar cartografías de alta resolución de los combustibles forestales existentes en Andalucía, tanto de modelos de combustible superficiales como variables descriptivas de los combustibles del estrato arbóreo, a partir de datos LiDAR, teledetección y otras fuentes de información previa disponibles, y su integración en la plataforma SIPNA (Sistema de Información sobre el Patrimonio Natural de Andalucía) de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).

- **Fase 2. Inventarios de campo para la parametrización y validación del combustible forestal.** El objetivo de esta segunda fase es mejorar las cartografías de combustible forestales previamente generadas en la fase 1 mediante la realización de inventarios exhaustivos de campo, con el fin de proporcionar información para parametrizar y validar tanto los modelos de combustible superficial como los descriptores del estrato arbóreo.

### 3. Metodología

#### 3.1. Área de estudio

El área de estudio es la totalidad del territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía junto con un buffer de 20 km exterior sobre Portugal y las Comunidades Autónomas (CCAA) limítrofes de Extremadura, Castilla-La Mancha y Murcia.

#### 3.2. Fuentes de datos

Se recopiló y analizó toda la cartografía oficial y fuentes de datos disponibles, para valorar su utilidad como fuente de información para la identificación de modelos de combustible y caracterización del estrato arbóreo, con especial atención a las zonas forestales. Esta tarea fue clave no sólo para recopilar los datos de partida sino también para detectar las lagunas de información existentes, bien por una inadecuada resolución espacial o temporal (ej. escala insuficiente, información obsoleta) o por falta de contenidos relevantes para la identificación de los modelos de combustible en los sistemas de clasificación solicitados (ej. caracterización insuficiente del matorral o sotobosque en zonas arboladas). Esta información también fue de utilidad para orientar un adecuado diseño de los inventarios de campo.

Los datos espaciales disponibles en REDIAM, en especial la cartografía asociada a SIPNA, fueron considerados prioritarios como fuente de datos para el diseño de los modelos de análisis geoespacial para la caracterización de combustibles forestales. Esta información se complementa con datos LiDAR del PNOA y sensores remotos pasivos que proporcionan información multispectral (Sentinel-2). El LiDAR aporta información estructural de alta resolución sobre la vegetación existente, añadiendo datos tridimensionales muy relevantes para la caracterización de combustibles, que no son capaces de obtenerse mediante la información proporcionada por fuentes de datos espaciales como SIPNA, actualmente basados en fotointerpretación. Adicionalmente, se consideraron otras fuentes de información disponibles de utilidad para la caracterización de los combustibles que complementan los datos espaciales anteriores (ej. parcelas de inventarios forestales, perímetros de incendios, etc.).

En la zona de buffer exterior de 20 km, se analizó la disponibilidad de datos similares a los existentes en Andalucía y su utilidad como fuente de datos (ej. vuelos LIDAR del PNOA con distintas fechas de vuelo en las CCAA colindantes). En caso de ausencia de información relevante (ej. sin datos LIDAR en Portugal), se propone la mejor alternativa con las fuentes de información disponibles.

#### 3.3. Modelos de combustible superficial

Los modelos de combustible superficial a revisar y parametrizar se centran en el sistema de clasificación específico para Andalucía denominado UCO40 desarrollado por el Laboratorio de Incendios Forestal de la Universidad de Córdoba (LABIF-UCO), que incluye 40 modelos de combustible adaptados a las condiciones mediterráneas del territorio andaluz (RODRÍGUEZ Y SILVA y MOLINA MARTÍNEZ, 2007). No obstante, las cartografías a validar y mejorar incluyen tanto los modelos UCO40 como los modelos del sistema de clasificación NFFL o de Rothermel desarrollados por el Servicio Forestal de EE. UU. (ANDREWS, 2018), adaptado por el antiguo ICONA (1987), que incluye los 13 modelos de combustible estándar que se han venido utilizando tradicionalmente en España.

A partir del mapa base de ocupación del suelo y tipos de vegetación derivados de SIPNA, se realizará una primera fase de clasificación según grupos genéricos de tipos de combustible (arbolado, matorral, pastizal, agrícola, y urbano-no combustible). Esta primera clasificación básica es necesaria para facilitar el proceso de asignación de los modelos de combustible posterior según los sistemas de

clasificación UCO40 y NFFL-Rothermel a partir de algoritmos de asignación específicos basados en información estructural derivada de los datos LiDAR.

### 3.4. Combustibles del estrato arbóreo

Las variables a utilizar para caracterizar el estrato arbóreo son:

- Altura de la masa (m)
- Altura de la base de las copas al suelo (m)
- Distancia del sotobosque a la base de las copas (m)
- Fracción de cabida cubierta (%)
- Carga de combustible del dosel arbóreo en el rodal (t/ha)
- Densidad aparente de las copas ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- Diámetro normal (cm)
- Grosor de la corteza (cm)
- Profundidad de la capa de hojarasca (cm)

Con el fin de priorizar las masas forestales en las que realizar los inventarios de campo para la caracterización de los combustibles del dosel arbóreo, se seleccionaron 15 formaciones de arbolado más relevantes en función de su importancia en el territorio andaluz y de su peligrosidad potencial en el comportamiento del fuego en grandes incendios.

Para la selección de las masas arboladas a inventariar, se hizo un análisis basado en la información de la capa de formaciones forestales integrada en SIPNA, considerando la especie principal de cada tesela y su cobertura, así como las especies secundarias existentes. En cada tesela se calculó la proporción de cobertura ocupada por cada especie. Para la discriminación entre masas monoespecíficas (dominadas por una especie) y masas mixtas (con presencia de otras especies), el criterio seguido para considerar una formación arbolada como mixta fue que la segunda especie más abundante en la tesela tuviese una proporción relativa mínima del 25% del total de cobertura arbolada, independientemente del valor total de fracción de cabida cubierta en cada tesela (FCC).

### 3.5 Inventarios de campo

Los inventarios de combustibles se están llevando a cabo intensivamente sobre las Zonas de Alto Riesgo de Incendio (ZAR) de Andalucía ampliados con un buffer de 5 km, que representan una superficie el 58% del total de la comunidad autónoma de Andalucía (50.550  $\text{km}^2$ ). Sin embargo, con el fin de obtener resultados cartográficos más robustos y representativos de toda la región andaluza, se están realizando inventarios adicionales fuera de las ZAR para caracterizar otras estructuras vegetales relevantes para la propagación de grandes incendios forestales.

En total, está previsto realizar 3.400 parcelas de inventario de modelos de combustible superficial, y 750 parcelas de inventario de los combustibles del dosel arbóreo. En parte de estas parcelas (aprox. 200) se llevarán a cabo también inventarios destructivos para determinar las cargas por fracciones (vivo/muerto, herbáceo/leñoso) y clases de tamaño (1h, 10h, 100h de tiempo de retardo) de los combustibles superficiales, con el fin de revisar los parámetros asociados a los modelos UCO40 más representativos. Se definieron protocolos de campo y se diseñaron estadillos específicos de recogida de datos para cada tipo de inventario según su finalidad (validación de cartografía de modelos de combustible superficial, parametrización de modelos UCO40, y modelización de combustibles del estrato arbóreo), que permiten caracterizar de forma adecuada los combustibles.

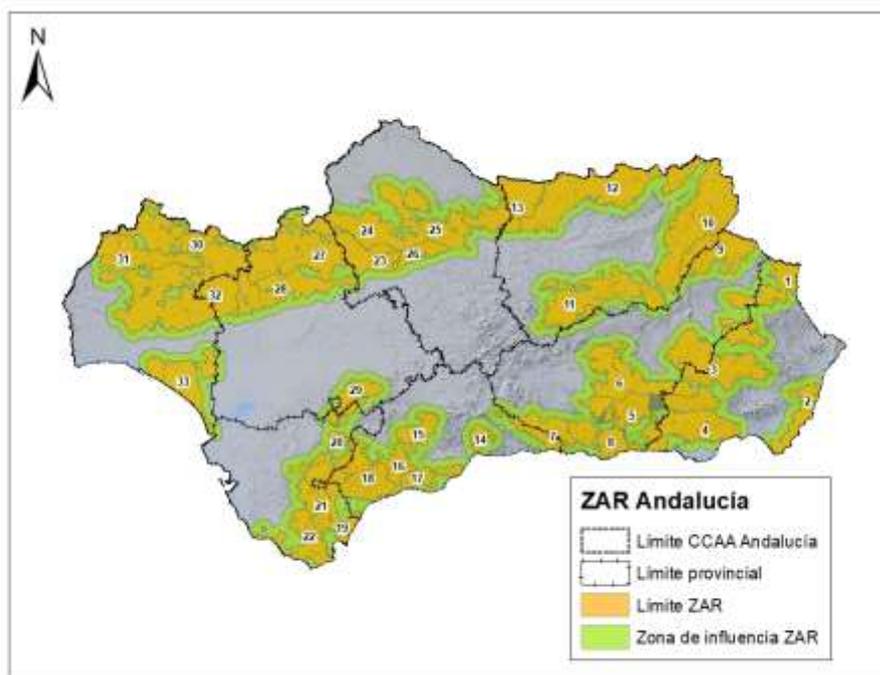


Figura 1. Localización de los Zonas de Alto Riesgo de incendio forestal (ZAR) en Andalucía.

Los muestreos de campo se realizarán para cada modelo de combustible superficial y estrato arbóreo de las formaciones seleccionadas. No obstante, la densidad de muestreo variará en función de las necesidades, siendo más intensos en las zonas y/o estructuras vegetales con menor información previa o donde se requiera de un mayor contraste para mejorar la calidad de la cartografía obtenida en la fase 1. En este sentido, la base de datos de las parcelas de inventario de combustibles de superficie (3.400 parcelas) se dividirá en dos submuestras, utilizando el 65% de los datos para calibración de los algoritmos de asignación y el 35% para validación independiente de las cartografías generadas. En el caso de la base de datos de los combustibles del estrato arbóreo (750 parcelas), todas las parcelas levantadas en cada formación arbolada se utilizarán para obtener las ecuaciones de estimación a partir de métricas LIDAR con el fin de mejorar el ajuste y considerar la mayor variabilidad estructural posible dentro de cada formación, validando los modelos matemáticos obtenidos mediante validación cruzada.

La información de los inventarios de campo también servirá de base para la parametrización de los modelos de combustible permitiendo su uso en los simuladores del comportamiento de los incendios forestales con datos ajustados a la realidad de la vegetación presente en el territorio, así como para la elaboración de una guía de campo que incorpore una clave fotográfica que facilite su identificación sobre el terreno a los técnicos.

### 3.6. Integración en SIPNA

La versión SIPNA actual (BAR\_HAB- Base Armonizada de Referencia de Hábitats de Andalucía de la REDIAM) consta de casi 12 millones de polígonos, bajo un modelo de datos multidimensional (diferentes temáticas) y multitemporal (distintas referencias de actualización). Estas clasificaciones del territorio y sus referencias temporales se engarzan a través de complejos procedimientos de armonización espacial que aúnan casi todas las bases de referencia de caracterización territorial existentes en Andalucía sobre territorio forestal, incluyendo la principal para la gestión del territorio a nivel nacional, SIGPAC, facilitando su comparabilidad.

Los trabajos a desarrollar en el marco del presente proyecto incluyen la parametrización de cada modelo de combustible y variables del dosel arbóreo conforme al modelo de datos definido por la plataforma SIPNA. Toda la información será integrada mediante el desarrollo de un nuevo módulo “Combustibles Incendios Forestales” dentro del Módulo Seguimiento de SIPNA, que permitirá obtener una primera cartografía de los combustibles forestales tanto superficiales como arbóreos para Andalucía y su zona de influencia, así como su actualización posterior a partir de nuevas fuentes de datos o revisión de las teselas tras perturbaciones que modifiquen los usos del suelo o la estructura de la vegetación.

#### 4. Resultados

En la fecha de preparación de esta comunicación, el proyecto estaba todavía en desarrollo tanto en la fase 1 (8 meses de duración, finalizando en febrero de 2022) como en la fase 2 (20 meses de duración, finalizando en diciembre de 2022), por lo que en este texto sólo se presentan resultados parciales y muy preliminares.

##### 4.1. Datos previos disponibles

La versión SIPNA de REDIAM utilizada ha sido una actualización reciente armonizada con nuevos datos disponibles de hábitats hasta 2016, incorporando también SIGPAC-2020 de forma que proporciona información integrada de ocupación de suelo en ámbitos tanto forestales como agrícolas, garantizando así el uso de la información de SIPNA más actualizada posible para la caracterización de combustibles. En la tabla 1 se resumen los datos recopilados y la información asociada a cada tipo fuente.

En relación a los datos LiDAR del PNOA, en la tabla 2 y figura 2 se detallan las coberturas recopiladas disponibles hasta la fecha dentro del territorio objeto de estudio, que se incorporarán al flujo de trabajo para la generación de cartografías preliminares de la fase 1. A pesar de no contar inicialmente con la información más actualizada para toda la zona de estudio, se espera disponer por completo de la 2ª cobertura LiDAR para Andalucía durante el desarrollo de la fase 2, lo que permitirá incluir datos LIDAR más actualizados en los procesados utilizados para la generación de las cartografías de combustible definitivas.

Tabla 1. Fuentes de datos. \* Información integrada en SIPNA. Fechas de vuelos LiDAR del PNOA: <sup>1</sup> primera cobertura y <sup>2</sup> segunda cobertura de Andalucía. <sup>3</sup> Cuencas intracomunitarias: atlántica (Tinto-Odiel-Piedras), mediterránea (incluido Guadalete) y centro (Guadalquivir).

Fuente de datos	Tipo de información asociada
LiDAR y MDT (PNOA 2014-2016 <sup>1</sup> y 2020-2021 <sup>2</sup> )	Atributos estructurales de la vegetación (alturas, coberturas, continuidad vertical de combustible)
VEGE10 (1:10.000)*	Cartografía y evaluación de la vegetación de la masa forestal de Andalucía
Cartografía SIOSE (1:25.000)	Identificación de usos y ocupación del suelo de España
Mapa forestal de España (1:50.000)	Identificación de especies en zonas forestales arboladas y desarboladas
Ortofotos PNOA 0.25m (2019 y 2020-21 <sup>3</sup> )	Identificación de usos del suelo, caracterización cualitativa de zonas forestales
Imágenes Sentinel-2	Identificación de usos del suelo, caracterización cualitativa de zonas forestales, detección de perturbaciones posteriores al vuelo LiDAR

Fuente de datos	Tipo de información asociada
IFN3 (2007)	VARIABLES cualitativas (composición) y cuantitativas de la vegetación (estructura) en zonas forestales
Datos de parcelas inventarios AMAYA	Parcelas de inventarios previos de ordenaciones de montes de utilidad pública realizadas en los últimos años
Cartografía de modelos de combustible existente	Identificación previa de tipos básicos de combustibles forestales
Cartografía histórica de incendios	Localización de zonas quemadas y fecha del incendio en el periodo 2015-2020
Zonas de Alto Riesgo de Incendios	Cartografía de Zonas de Alto Riesgo de incendios forestales en Andalucía existente en la actualidad
Cartografía de recintos SIGPAC*	Información relativa a los recintos de uso agrícola. Integrada en SIPNA
Núcleos urbanos IGN	Delimitación de núcleos de población
COS 2018 (Portugal)	Cartografía de usos y ocupación del suelo de Portugal
IFN Fotopuntos 2015 (Portugal)	Parcelas del Inventario Forestal Nacional de Portugal con información sobre especies y coberturas

Tabla 2. Datos LiDAR del PNOA recopilados para la zona de estudio

CCAA	Vuelo LiDAR	Fecha	Densidad	Zona (Lote vuelo)
Andalucía	2ª cobertura	2020-2021	1.5 p/m <sup>2</sup>	Cuenda Atlántica (AND-CA) Cuenca Mediterránea ( AND-CM) Andalucía Centro (AND-C)
	1ª cobertura	2014-2015	0.5 p/m <sup>2</sup>	Resto de Andalucía
Extremadura (buffer 20 km)	2ª cobertura	2018	0.5 p/m <sup>2</sup>	Extremadura Sur (EXT-S)
Castilla-La Mancha (buffer 20 km)	1ª cobertura	2009	0.5 p/m <sup>2</sup>	Castilla-La Mancha Suroeste (Lote 7-CLM y Lote 5-CLM)
Murcia (buffer 20 km)	2ª cobertura	2016	0.5 p/m <sup>2</sup>	Murcia-Alicante (MUR-ALI)

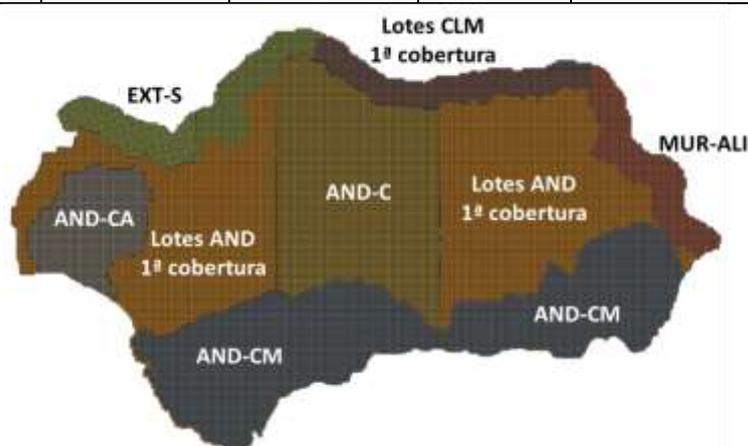


Figura 2. Mapa de las distintas coberturas LiDAR PNOA disponibles en Andalucía y las CCAA adyacentes para la generación de cartografías de combustibles preliminares de la fase 1.

## 4.2. Inventarios de combustibles

Hasta la fecha de presentación de esta comunicación, se habían realizado 610 parcelas repartidas mayoritariamente por la provincia de Huelva (Río Tinto, Sierra de Huelva, Doñana, y zonas fuera de ZAR) y por la provincia de Sevilla (Sierra Norte). Los inventarios se están llevando a cabo tanto en montes públicos como privados. En la siguiente figura se puede ver la distribución de las parcelas actualmente realizadas.

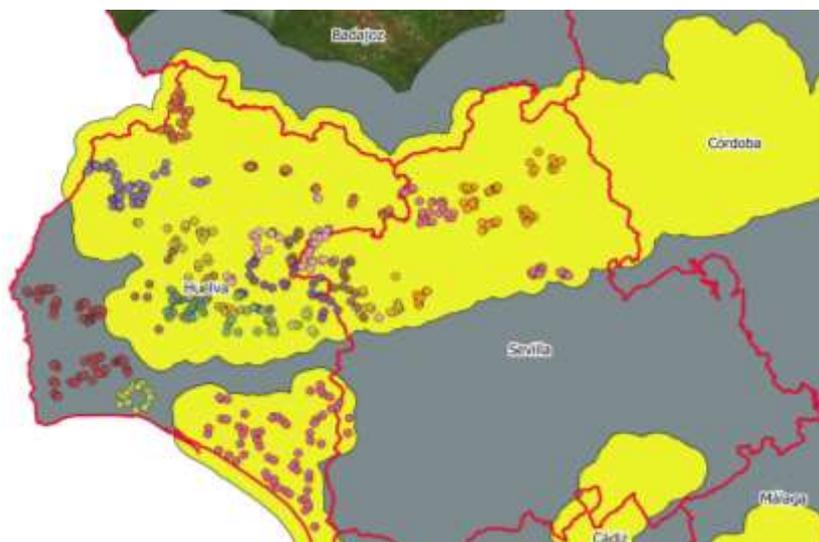


Figura 3. Parcelas de inventario de combustibles forestales realizadas hasta la fecha sobre la zona de estudio. En amarillo, las Zonas de Alto Riesgo de Incendio (ZAR) con un buffer de 5 km.

## 4.3. Modelo de datos de análisis geospacial para la generación de cartografía de combustible

### 4.3.1. Cartografía de modelos de combustible superficiales

El flujo general de trabajo consiste primero en la generación de una cartografía base de coberturas vegetales a partir la información proporcionada por SIPNA así como otras fuentes de datos disponibles que permitan actualizar zonas críticas con perturbaciones posteriores (ej. imágenes Sentinel-2, perímetros de incendios). Este mapa base de vegetación actualizado, que fundamentalmente proporciona información cualitativa de las distintas formaciones existentes a nivel de teselas, se rasteriza para poder aplicar a nivel de pixel unos algoritmos de decisión que proporcionan información estructural y cuantitativa de la vegetación derivada de datos LiDAR. Los algoritmos de decisión basados en datos LiDAR están específicamente definidos para las tipologías básicas identificadas previamente en el mapa base, y asignarán un valor único del modelo de combustible correspondiente según ambas clasificaciones (UCO40 y NFFL-Rothermel), el más adecuado a cada tesela homogénea de vegetación derivada de SIPNA conforme a los parámetros descriptivos cualitativos (estratos de vegetación presentes, composición específica, etc.) y combinando datos cuantitativos derivados de las métricas LiDAR (cobertura, altura de cada estrato, distribución espacial del combustible, etc.). En la figura 4 se muestran las capas ráster con pixel de 20 m de la altura media de la vegetación y la fracción de cabida cubierta del arbolado, obtenidas mediante el procesado de los distintos vuelos LiDAR del PNOA disponibles para Andalucía y las CCAA adyacentes.

Por tanto, el modelo de cálculo para la asignación de modelos de combustible trabaja a alta resolución espacial (20 m), combinando diferentes fuentes de datos complementarias para integrar tanto parámetros cualitativos (SIPNA, perímetros de incendios) como cuantitativos (LiDAR) para las

diferentes coberturas existentes. Los inventarios de campo servirán para ajustar los umbrales de los algoritmos utilizados para generar las cartografías iniciales durante la fase 1, obteniendo así cartografías mejoradas, calibradas y validadas con datos de campo en la fase 2.

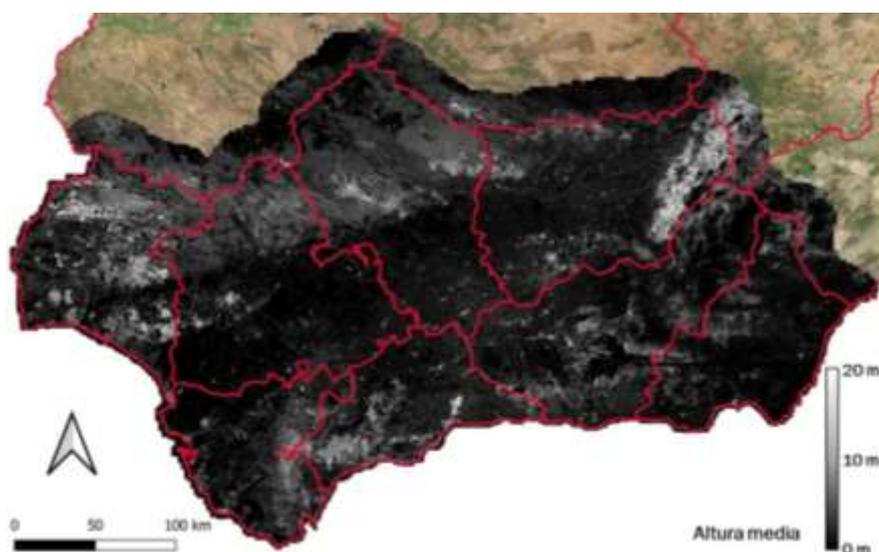
Finalmente, las capas generadas se obtendrán tanto en formato ráster de alta resolución (pixel de 20 m) como en formato vectorial (geometría derivada de la tesela SIPNA) con continuidad para toda la zona de estudio.

#### 4.3.2. Combustibles del estrato arbóreo

La metodología propuesta para la caracterización de las variables descriptivas del estrato arbóreo se fundamenta en el diseño de algoritmos basados en datos LiDAR para la caracterización de información de parámetros estructurales de la masa a escala de rodal.

Algunos de estos parámetros se caracterizarán bien mediante asignación directa a determinadas métricas LiDAR (ej. fracción de cuba cubierta). Sin embargo otros parámetros, en particular los relacionados con los combustibles de las copas (altura de la base de las copas, carga de combustible disponible, densidad aparente de copas) requieren de una modelización previa que permita su estimación en función de ecuaciones que combinan varias métricas LiDAR, ajustadas de forma diferencial para cada especie arbolada o tipo de formación. Inicialmente, para la estimación de este tipo de variables estructurales en la fase 1 se utilizarán las mejores ecuaciones disponibles en la literatura científica en función de las especies arbóreas principales asociadas a cada tesela SIPNA. Una vez concluidos los inventarios de campo de la fase 2, se ajustarán ecuaciones propias para las masas forestales andaluzas más relevantes a partir de los datos de las parcelas correspondientes a cada formación arbolada seleccionada.

En la tabla 3 se muestran las formaciones arboladas seleccionadas para la realización de los inventarios de campo y posterior modelización de parámetros descriptivos de los combustibles, incluyendo el número de parcelas totales a realizar. En el diseño del muestreo se tiene en especial consideración la variabilidad espacial y dispersión geográfica existente a la hora de ubicar las parcelas de campo.



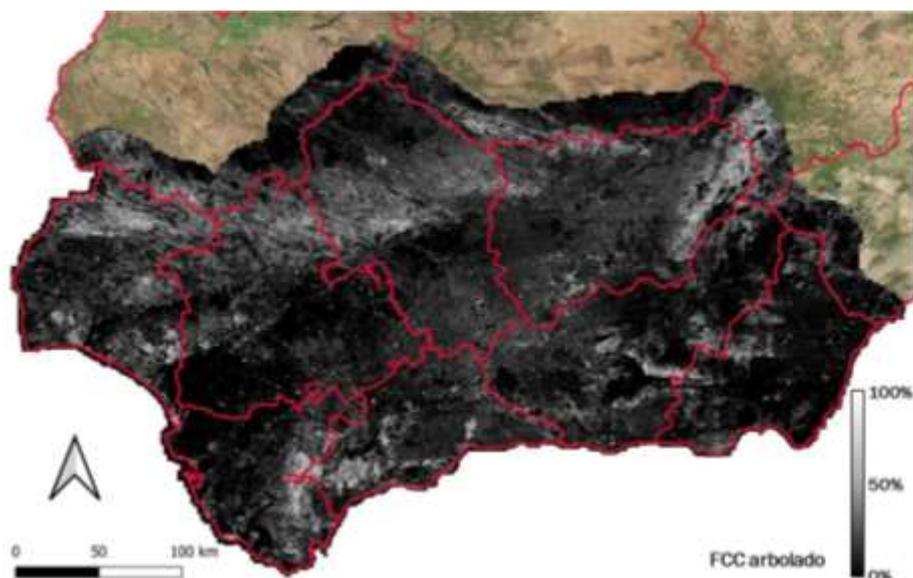


Figura 4. Altura media de la vegetación (arriba) y fracción de cabida cubierta del arbolado (abajo) en la zona de estudio (ráster de 20m), derivada del procesamiento de los vuelos LiDAR PNOA disponibles para Andalucía y las CCAA adyacentes.

Tabla 3. Número de parcelas a realizar en el inventario de arbolada para cada formación seleccionada.

Orden	Formación arbolada seleccionada	Superficie (ha)	Nº parcelas
1	<i>Quercus ilex</i> (incluyendo masas adhesionadas)	1.218.082	90
2	<i>Pinus halepensis</i>	241.798	60
3	<i>Pinus pinea</i>	206.213	60
4	<i>Quercus suber</i>	190.698	60
5	<i>Eucalyptus sp</i>	138.373	60
6	<i>Olea europaea var. sylvestris</i> (pura o mixto)	138.334	60
7	<i>Pinus pinaster</i>	116.117	50
8	<i>Pinus nigra</i>	61.436	50
9	<i>Q. ilex</i> + <i>P. halepensis</i>	47.254	50
10	<i>Pinus sylvestris</i>	28.766	40
11	<i>P. pinaster</i> con <i>Q. ilex</i> o <i>Q. suber</i>	27.535	40
12	<i>Q. faginea</i> / <i>Q. pyrenaica</i> pura o con <i>Q. ilex</i> / <i>Q. suber</i> (S. Morena)	18.934	40
13	<i>P. pinea</i> + <i>Q. ilex</i> o <i>Q. suber</i>	19.370	30
14	Masas de <i>Quercus</i> mixtas (PN Alcornocales)	17.460	30
15	<i>Eucalyptus</i> + <i>Pinus sp</i>	10.510	30
	<b>TOTAL</b>	<b>2.480.268</b>	<b>750</b>

Por otro lado, para los descriptores del arbolado con más nivel de detalle y de difícil caracterización mediante sensores remotos activos (LiDAR) o pasivos (imágenes ópticas satelitales), como el grosor de corteza o la profundidad de la hojarasca, se utilizará información combinada de fuentes de datos adicionales y de los inventarios de campo.

Finalmente, se generará una capa para cada uno de los descriptores del estrato arbóreo con influencia relevante en el comportamiento del fuego, tanto en formato ráster de alta resolución (pixel de 20 m) como en formato vectorial (geometría derivada de teselas SIPNA). Estas cartografías del estrato arbóreo se obtendrán exclusivamente para la superficie ocupada por masas forestales arboladas, a través de modelos de cálculo diseñados con distintos flujos de trabajo en función de la información previa disponible en cada caso.

#### **4.4. Definición del modelo de datos según los estándares de la plataforma SIPNA y mecanismos de actualización**

Los nuevos productos cartográficos de combustibles incluyen la parametrización de cada tipología conforme al modelo de datos definido para la plataforma SIPNA. Toda la información será integrada mediante el desarrollo de un nuevo módulo “Combustibles Incendios Forestales” dentro del Módulo Seguimiento de SIPNA, que permitirá obtener una primera cartografía de los combustibles forestales tanto superficiales como arbóreos. Cada entidad geométrica (recinto) de SIPNA contará con una ‘etiqueta de combustible’ además de la ya conocida ‘etiqueta SIPNA’. Este modelo es resiliente a las modificaciones que se permiten en la actualidad en las interfaces de trabajo de SIPNA (ROMERO et al, 2018), y que se encuentran limitadas a dos: la división del polígono SIPNA, que derivará en la herencia de la temática relativa al combustible en los polígonos productos, y la traslación (pegado) de etiqueta SIPNA, que no supone modificación alguna en la parte de combustibles.

La metodología se ha planteado de forma que a futuro se puedan aplicar fácilmente mecanismos de revisión o actualización que eviten que las cartografías de combustibles forestales generadas se queden rápidamente obsoletas. En este sentido, conviene diferenciar los distintos niveles posibles de modificación en relación a las fuentes de información que afectan al flujo de cálculo para la caracterización de los combustibles forestales:

- 1) Cambios en usos del suelo, derivados de las revisiones continuas de teselas (procedimiento habitual de mantenimiento de SIPNA). Al ser una plataforma dinámica, es habitual que haya correcciones por fotointerpretación (que es la información de base de SIPNA) en aspectos como cambios de usos de suelo (código ocupación), consolidándose los cambios cada 6 o 12 meses.
- 2) Disponibilidad de nuevos vuelos LiDAR del PNOA. Se definirán claramente los flujos de entrada requeridos para la información LiDAR: métricas utilizadas en los algoritmos de cálculo de los modelos de combustible y descriptores del estrato arbóreo, así como los umbrales utilizados para la asignación de modelos de combustible de superficie.
- 3) Nuevas imágenes Sentinel-2. Se generará un paquete de herramientas de procesamiento de imágenes que sea aplicable automáticamente y de manera consistente sobre datos de la misión Sentinel-2, las imágenes óptimas a utilizar durante futuros procesos de actualización de los modelos por su resolución espacial y temporal.

#### **5. Discusión**

La modelización y tipificación del combustible forestal demanda una actualización periódica y un seguimiento, tanto por la propia evolución de la vegetación, especialmente las estructuras vegetales menos maduras, como por las perturbaciones que acontezcan debidas a incendios

forestales, aprovechamientos o cambios de uso. Agresta cuenta con una metodología propia de trabajo basada en datos LiDAR, de rápida actualización a partir de nuevas fuentes de información, para la generación de cartografía de alta resolución de modelos de combustible forestal a escala regional (MARINO et al., 2016). Esta metodología, previamente validada para la identificación de los modelos de combustible NFFL-Rothermel, así como para otros sistemas de clasificación, se ha utilizado con éxito para la generación de cartografía de detalle de modelos de combustible actualizadas tanto a nivel regional (ej. Canarias, La Rioja) como a menor escala (comarcal, montes, etc.), sirviendo de base para el diseño del modelo de cálculo propuesto para la asignación de modelos de combustible en el presente proyecto. En este caso, el reto ha sido adaptar la metodología a las particularidades del sistema UCO40, la gran dimensión de la superficie de trabajo a inventariar y procesar, así como las diferentes fuentes de datos disponibles para el territorio andaluz, en particular los datos de REDIAM integrados en la plataforma SIPNA, y zonas adyacentes (ej. vuelos LiDAR de distintas características).

La incorporación de inventarios de campo exhaustivos garantizará la calidad de las cartografías generadas, adaptadas a las particularidades de los modelos de combustibles mediterráneos existentes en el territorio andaluz. Por otro lado, para la caracterización de los combustibles de las copas, los trabajos de inventario de campo se centrarán en las principales masas arboladas de Andalucía, incluyendo las formaciones más representativas con especies de quercíneas, pinos y eucaliptos. Aunque existen estudios previos que aportan ecuaciones de estimación de los combustibles de las copas a partir de LiDAR aéreo, la mayoría se refieren a trabajos en coníferas no autóctonas o para formaciones arboladas peninsulares que no son del entorno mediterráneo (ANDERSEN, 2005; GONZALEZ-FERREIRO et al. 2014, 2017; GONZÁLEZ-OLABARRIA et al. 2012). Algunos trabajos recientes aportan ecuaciones para especies de frondosas mediterráneas, pero están ajustados para inventarios realizados en zonas relativamente pequeñas, lo que limita su extrapolación a escala regional por la mayor variabilidad estructural de las masas arboladas sobre las que se deben aplicar (BOTEQUIM et al., 2019, FERRER PALOMINO y RODRIGUEZ Y SILVA, 2021). Los datos de campo obtenidos en este proyecto proporcionarán la información necesaria para la generación de ecuaciones de estimación de los combustibles del estrato arbóreo a partir de datos LiDAR del PNOA adaptadas a las principales formaciones del entorno mediterráneo, aportando nuevos modelos complementarios a los existentes en la literatura científica actual, tanto para coníferas (principales especies del género *Pinus*) como para frondosas (en especial del género *Quercus* y *Eucalyptus*).

Por otro lado, las cartografías de modelos de combustible superficial incluirán como metadatos la parametrización asociados a cada tipología según ambas clasificaciones consideradas (UCO40 y NFFL-Rothermel). De esta forma, cada modelo de combustible incluirá una tabla de atributos con toda la información necesaria para su integración en los simuladores del comportamiento del fuego más utilizados (FARSITE, BEHAVE PLUS y WILDFIRE ANALYST). Los parámetros se definirán para cada modelo de combustible según el sistema de clasificación correspondiente: UCO40 (RODRÍGUEZ Y SILVA y MOLINA MARTÍNEZ, 2007) y NFFL-Rothermel (ANDREWS, 2018). Estos productos cartográficos serán por tanto fácilmente integrables en los sistemas utilizados por los operativos de prevención y extinción de incendios del INFOCA. Además, la incorporación de estas nuevas cartografías a la plataforma SIPNA mediante nuevos desarrollos específicos para el seguimiento de los combustibles garantiza su coherencia con el resto de información espacial así como en las posteriores revisiones para su actualización, lo que le aporta un gran valor añadido para su utilización en la planificación de actuaciones eficaces con especial importancia en la gestión de grandes incendios forestales.

## 6. Conclusiones

El presente trabajo muestra las metodologías y resultados preliminares que se están desarrollando en el marco del proyecto CILIFO para la mejora de la caracterización de los combustibles superficiales y arbóreos presentes en la comunidad autónoma de Andalucía. Este proyecto incorpora tanto la generación de cartografías de calidad de modelos de combustible superficial (clasificación UCO40 y NFFL-Rothermel) y de combustibles de copas (altura de base de copa, carga disponible y densidad aparente) basadas en datos LiDAR del PNOA y datos de campo, como una herramienta para su revisión, actualización e integración en la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) a través del “Módulo Seguimiento” de la plataforma SIPNA (Sistema de Información del Patrimonio Natural de Andalucía). Los productos y desarrollos derivados de este proyecto tienen una gran relevancia no sólo a nivel autonómico sino nacional, dado que serán las cartografías de combustibles de alta resolución a escala regional más actualizadas y con mayor nivel de detalle obtenidas a partir de datos LiDAR hasta la fecha, incluyendo los territorios limítrofes de las comunidades autónomas adyacentes y Portugal.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto CILIFO (Centro Ibérico para la Investigación y Lucha contra Incendios Forestales), cofinanciado con el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER dentro del programa Interreg V A España – Portugal (POCTEP) 2014-2020. Los autores agradecen la colaboración de la REDIAM de Andalucía, en especial a Juan José Vales y Yolanda Gil por facilitar los datos LiDAR y las fuentes de datos relacionadas con SIPNA, así como a Jesús Garrido del IGN (MITMA) por los datos LiDAR más recientes en las CCAA adyacentes. Nuestro reconocimiento también a los responsables, técnicos y agentes medioambientales de las distintas Delegaciones Territoriales de la CAPGDS, por facilitarnos información previa así como el apoyo en el acceso a los montes. Por último, agradecer a Pablo Ascasibar su apoyo con los datos GPS, a José Manuel Rojas, José Pelayo López, Alberto Lora y Pedro Tribaldos su contribución en los trabajos de campo, así como al personal del equipo de incendios de la UCO por su apoyo en laboratorio.

## 8. Bibliografía

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

ANDREWS, P.L.; 2018. The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 121 p.

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

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).

GONZALEZ-FERREIRO, E., DIÉGUEZ-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.

GONZÁLEZ-FERREIRO, E., ARELLANO-PÉREZ, S., CASTEDO-DORADO, F., HEVIA, A., VEGA, J. A., VEGA-NIEVA, D., RUIZ-GONZÁLEZ, A. D.; 2017. Modelling the vertical distribution of canopy fuel load using national forest inventory and low-density airborne 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.

ICONA; 1987. Clave fotográfica para la Identificación de modelos de combustible. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Instituto para la Conservación de la Naturaleza. Área de Defensa contra Incendios Forestales, 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.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MOLINA MARTÍNEZ, J.R.; 2007. Manual técnico para la modelización de la combustibilidad asociada a los ecosistemas forestales mediterráneos. Laboratorio de Defensa contra Incendios Forestales Departamento de Ingeniería Forestal Universidad de Córdoba.

ROMERO, D. R., MORATO, A. R., JIMÉNEZ, G., FERNÁNDEZ, P. N., PARRILLA, M. D., CORDERO, M. M., CÁCERES CLAVERO, F., GIMÉNEZ DE AZCÁRATE FERNÁNDEZ, F., ORTEGA DÍAZ, E., OJEDA ZÚJAR, J., MOREIRA MADUEÑO, J.M.; 2018. 'CLOUDCARTO'. Una nube para cartografiar en equipo. REDIAM. En López García M.J., Carmona, P., Salom, J., Albertos J.M. (Eds.). *Tecnologías de la información geográfica: perspectivas multidisciplinares en la sociedad del conocimiento*. Universitat de València. 801-811. XVIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Junio 2018, Valencia.