



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



Vulnerabilidad integral de los sistemas forestales frente a incendios: resultados científicos del proyecto “VIS4FIRE”

MADRIGAL, J.^{1,6,7}, FONTURBEL, T.², DE LAS HERAS J.³, RODRÍGUEZ Y SILVA F.⁴, RUIZ A.D.⁵

¹ Centro de Investigación Forestal (INIA, CSIC)

² Centro de Investigación Forestal de Lourizán.

³ Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Albacete

⁴ Universidad de Córdoba

⁵ Universidad de Santiago de Compostela. Campus Lugo

⁶ ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

⁷ iuFOR, El Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible, uVA-INIA.

Resumen

Se sintetizan los resultados científicos más importantes del proyecto VIS4FIRE cuyo objetivo principal es la caracterización y análisis de manera integral de los componentes que determinan la vulnerabilidad de sistemas forestales a los incendios con objeto de sentar las bases para la elaboración de un sistema normalizado que permita su uso generalizado en sistemas forestales ibéricos. Se han obtenido nuevos modelos de predicción de la humedad del combustible vivo basados en imágenes de satélite para evaluar la vulnerabilidad y los cambios en la inflamabilidad del matorral. La susceptibilidad al fuego de superficie y copas en masas de pinar sometidos a claras se han analizado mediante muestreos de campo y simulación, así como los efectos del fuego prescrito como tratamiento preventivo y de mejora de la resiliencia de masas arbóreas. Se han generado importantes avances en herramientas metodológicas para evaluar la vulnerabilidad socioeconómica a los incendios en un contexto de cambio global. De igual manera se ha testado en campo y laboratorio la eficacia de las medidas de control de la erosión para disminuir la vulnerabilidad de ecosistemas afectados por fuego de alta severidad. Algunos de estos resultados se usarán para generar productos útiles para la gestión

Palabras clave

Cambio Global; Gestión adaptativa; Gestión del combustible; Incendios forestales; Modelización combustibles.

1. Introducción

Los incendios constituyen una amenaza en muchas áreas forestales, con importantes repercusiones medioambientales y socioeconómicas. Las previsiones sobre el cambio climático y el cambio en la gestión y el uso del suelo auguran un agravamiento importante del problema trascendiendo al ámbito de la Protección Civil. La propuesta que se presenta parte de la hipótesis de que el conocimiento de la vulnerabilidad al fuego, es un elemento crucial para planificar las estrategias de gestión dirigidas a la defensa integrada contra incendios forestales.

La vulnerabilidad de un sistema ante una perturbación, se define a través de tres componentes principales: la exposición al factor de estrés, la sensibilidad a un rango de variabilidad estresante y la resiliencia después de la exposición. Los incendios forestales representan un importante motor de cambio a nivel de ecosistemas y paisajes en la región mediterránea. Las características ambientales y la vegetación son factores clave para estimar la vulnerabilidad ecológica al fuego. Sin embargo, no se ha obtenido hasta ahora una visión integral que además incluya la gestión forestal como elemento de perturbación pero también de estabilidad y mejora de la resiliencia de nuestros bosques (MORI 2015, Figura 1).



Figura 1. Planificación y gestión adaptativa como alternativa para aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad de los sistemas forestales a incendios (adaptado de Mori 2015).

Existen aportaciones científicas desde el campo de la ecología del fuego sobre el efecto de la recurrencia de incendios sobre comunidades de matorral. Sin embargo son escasos los estudios que relacionen recurrencia con vulnerabilidad de sistemas forestales. Aunque se conocen algunos de los mecanismos ecológicos que rigen estrategias adaptativas como los espesores de corteza, que han sido más profundamente estudiadas para *Quercus suber*, es escaso el conocimiento real en otras especies españolas, así como sus implicaciones en la resistencia ante incendios y quemas prescritas. De igual manera son escasas las referencias en España de fuegos experimentales bajo arbolado de alta severidad (RODRÍGUEZ Y SILVA et al. 2017).

Los modelos de comportamiento del fuego desarrollados en otros países están siendo testados y utilizados en España con resultados dispares. En EEUU ya están detectando la necesidad de obtener modelos fiables en complejos de combustible que no se adecúan a los modelos clásicos como es el comportamiento del fuego en triturados procedentes de tratamientos preventivos o modelos específicos de quemas bajo arbolado, con un comportamiento muy condicionado por las líneas de encendido y la época de quema fuera de campaña estival. De igual forma los simuladores ayudan a optimizar los puntos estratégicos de gestión (PEGs) (MADRIGAL et al. 2019) y los perímetros de cuencas operacionales (PODs) pero sólo si las predicciones son adecuadas.

Los aspectos económicos en relación con la vulnerabilidad han sido poco estudiados y existen pocos datos de cómo la mejora de las operaciones de extinción pueden optimizar el coste beneficio de las actuaciones. Tampoco existe información en España de cómo las dificultades de extinción, en gran parte generadas por la ausencia de uso y mantenimiento de infraestructuras o de problemas operativos en el dispositivo, pueden hacer más vulnerable al sistema forestal y a los combatientes (CALKIN et al. 2011). La aversión al riesgo en la toma de decisiones durante la extinción también necesita un análisis económétrico ausente hasta el momento en nuestro país.

Los incendios forestales influyen de manera importante en el avance de la desertificación. Las acciones urgentes de estabilización de suelo tras incendios y la restauración hidrológico-forestal es uno de los instrumentos para el cumplimiento de los objetivos de la Estrategia de la UE sobre conservación de suelo y la biodiversidad. Varios son los protocolos establecidos para la restauración de zonas incendiadas (ALLOZA et al. 2014; VEGA et al. et al., 2013), pero es necesario saber cómo afectan estas técnicas a la vulnerabilidad de las zonas tratadas (LUCAS-BORJA et al. 2020). Por lo

tanto, es necesario investigar sobre la eficiencia y eficacia de las medidas de restauración hidrológico-forestal, de manera que se establezcan las herramientas más adecuadas para corregir las perturbaciones y alteraciones generadas por un incendio forestal en los ecosistemas forestales. Ello mejorará la resiliencia y disminuirá la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales afectados por incendios forestales. En muchas ocasiones, la gestión del arbolado quemado debe compatibilizarse con las actividades de restauración post-incendio, siendo necesario aumentar la información sobre esta temática (MADRIGAL et al. 2011).

2. Objetivos

El principal objetivo del presente proyecto es la caracterización y análisis de manera integral de los componentes que determinan la vulnerabilidad de sistemas forestales a los incendios con objeto de sentar las bases para la elaboración de un sistema normalizado que permita su uso generalizado en sistemas forestales ibéricos. La consecución de este objetivo se llevará a cabo mediante el desarrollo de metodologías, herramientas y tecnologías, antes, durante y después del incendio, a través de los siguientes objetivos parciales:

- Predicción de características de combustibles como elemento clave de la vulnerabilidad ante un incendio
- Determinación de la influencia de tratamientos preventivos en los componentes de la vulnerabilidad
- Evaluación de la influencia de la severidad y recurrencia de incendios en la resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas forestales
- Mejora de la predicción del comportamiento del fuego para reducir la vulnerabilidad de las masas forestales
- Análisis econométrico de la vulnerabilidad en los aspectos relacionados con la producción y capacidad operacional, toma de decisión en ambientes de incertidumbre y manejo del fuego
- Evaluación de la efectividad de tratamientos para la restauración post-incendio y de su influencia en la vulnerabilidad del sistema forestal afectado por el fuego
- Aproximación a un análisis de la vulnerabilidad integral de un sistema forestal afectado por el fuego

Se pretende generar conocimiento científico y técnico en relación a la evaluación de la vulnerabilidad ante incendio que permita llevar a cabo una gestión más eficiente e integral de protección y defensa del paisaje forestal en el marco de una gestión forestal sostenible.

3. Metodología

La consecución de los objetivos del proyecto, requiere un enfoque plural y multidisciplinar de las actividades por lo que el proyecto se compone de cinco subproyectos (INIA, CIF-Lourizán, UCLM, USC, UCO) que aseguren una visión integral e integrada empleando aproximaciones metodológicas complementarias en varias de las actividades (Figura 2). Se pretende optimizar las complementariedades y sinergias, evitando solapamientos y optimizando la experiencia de los participantes, sobre diferentes aspectos ligados a los objetivos, así como la disponibilidad de importantes recursos, equipos, infraestructuras y parcelas experimentales en distintas zonas geográficas (Figura 3).

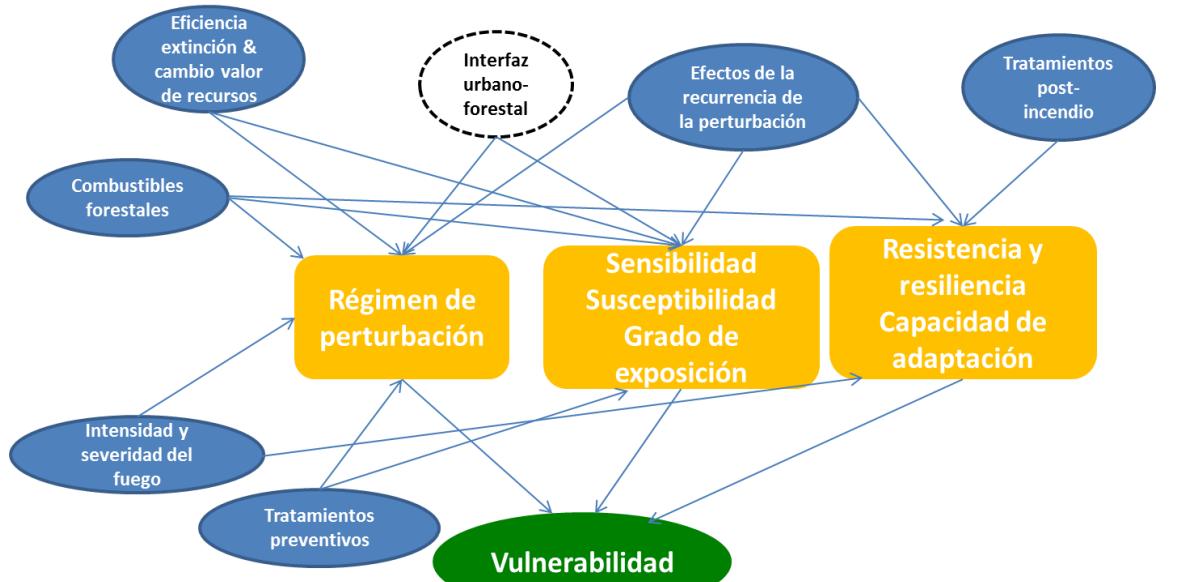


Figura 2. Resumen metodológico que relaciona los objetivos y variables analizadas en el proyecto.

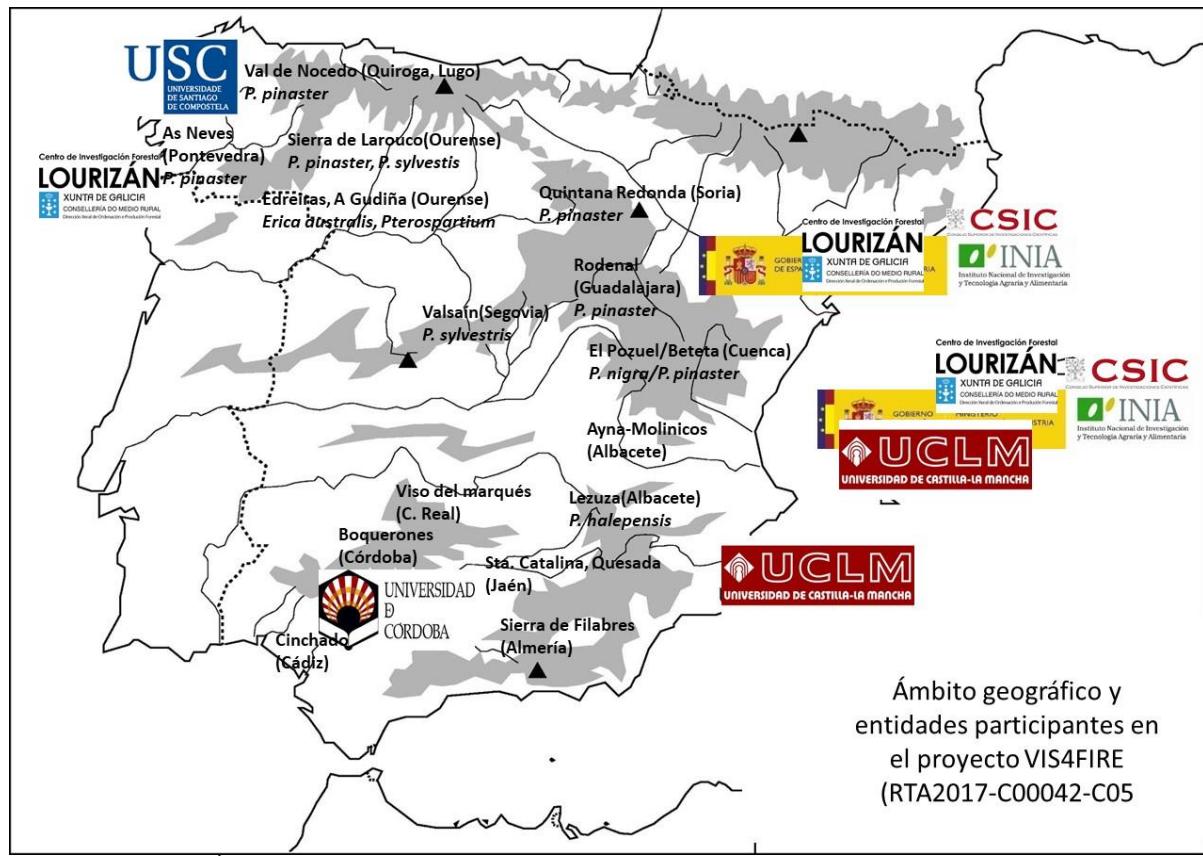


Figura 3. Ámbito geográfico del proyecto con ubicación de algunos de los dispositivos experimentales.

4. Resultados

Se describen las líneas principales del proyecto y los resultados más importantes. Algunos de ellos se pueden consultar en su versión más extendida como comunicaciones del 8º Congreso Forestal Español y otros de los resultados han sido publicados en revistas científicas o han sido

OBJETO de tesis doctorales. Parte de los resultados tienen continuidad en el proyecto ENFIRES (PID2020-116494RR-C41 “Mejora de la resiliencia a los incendios de los sistemas forestales mediterráneos”).

4.1. Caracterización de combustibles como elemento clave de la vulnerabilidad ante un incendio

Se han desarrollado modelos de estimación de las cargas de combustible en formaciones de matorral desarbolado y en sotobosque a partir de variables biométricas. Así, en la Zona N de España (ALONSO-REGO et al. 2020; VEGA et al. 2022) se han caracterizado diferentes comunidades vegetales, en áreas de matorral: 1) tojales de *Ulex europaeus*; 2) tojales de *Ulex gallii* o *Ulex minor*; 3) brezales de *Erica australis*, *Erica arborea* o *Erica scoparia*; 4) brezales de *Erica umbellata* o *Erica mackiana*; 5) carquejales de *Pterospartium tridentatum*; 6) retamares de *Cytisus multiflorus*; 7) retamares de *Cytisus striatus*, *Cytisus scoparius* o *Genista obtusiramea*; 8) jarales de *Cistus ladanifer*, así como un sistema de ecuaciones para estimar la carga en helechales de *Pteridium aquilinum*. También se han caracterizado los combustibles de superficie y copas en pinares sometidos a clareos y claras (ARELLANO et al. 2020). La inclusión de la cobertura de matorral, y especialmente del espesor de la hojarasca y el mantillo en los modelos de estimación de cargas ajustados dificultan su uso para generar cartografía de combustibles a partir de métricas LiDAR. Es por esta razón por la que se decidió ajustar, mediante los procesos de agregación-desagregación, otra colección de sistemas de modelos, pero utilizando esta vez la altura media del matorral (variable con posibilidades de estimación a partir de LiDAR) como única variable independiente en los modelos. Estos sistemas se ajustaron para las nueve formaciones de forma independiente y también para las formaciones agrupadas.

Se obtuvieron los perfiles verticales de distribución de combustibles de superficie y de copas de las parcelas del último IFN disponible para toda España. Esta información ha permitido desarrollar un catálogo de fichas de combustibles con estimaciones de cargas en función de la especie dominante, el estado de evolución y variables dasométricas sencillas (NUNES et al 2020).

En el Centro de España, se integró la información del IFN, sensores remotos (LiDAR, satelitales) y parcelas de campo (Forestéreo) para modelizar los combustibles de superficie y copas del Sistema Central (ver comunicación del presente congreso MARINO et al. 2022)

En el Sur de España se determinaron las cargas de combustibles del dosel arbóreo mediante funciones alométricas, para su inclusión en los simuladores de comportamiento del fuego Visual-Fuego y evaluación del impacto económico Visual-Seveif.

Se seleccionaron 20 sitios de muestreo en rodales de *P. radiata* en Galicia sin podar, se determinó la biomasa fina muerta acumulada en los primeros 6 metros desde el suelo y se obtuvieron modelos de estimación a nivel de árbol individual y de rodal (artículo en preparación). Los modelos ofrecen un alto ajuste y son de aplicación directa a la gestión. En la zona SE de España se utilizaron las parcelas permanentes para determinar la tasa de desfronde de las masas de *P. nigra* en la provincia de Cuenca (Beteta y El Pozuelo) y la dinámica de acumulación de combustibles muertos. Con los resultados de los consumos de combustible durante la ejecución de las quemas prescritas se ha valorado la eficacia en la reducción de la tasa de acumulación y, por tanto, la periodicidad necesaria del tratamiento (longevidad del mismo) que en estas condiciones se ha determinado en 4 años. Los resultados ofrecen información sobre el grado de vulnerabilidad de estas masas a incendios de superficie y en qué medida los programas de quemas prescritas podrían aumentar la resiliencia a esta perturbación. Los resultados de las analíticas foliares para describir los ciclos biogeoquímicos durante el proceso no ofrecen grandes diferencias entre parcelas quemadas y control con lo que se

considera que la quema prescrita no ejerce una influencia importante en el ciclo de nutrientes (ESPINOSA et al. 2020), al menos tras un solo tratamiento de quema.

Se seleccionaron fustales de *P. pinaster* en Galicia, en los que se habían efectuado cortas a hecho y claras y en los que los restos resultantes fueron sometidos a trituración. En ellos se realizaron inventarios destructivos en campo y trabajo de laboratorio para la caracterización de los combustibles resultantes de la trituración. Se desarrollaron ecuaciones predictivas de las cargas de combustible triturado en función principalmente de la cobertura y espesor de esos combustibles.

En un área afectada por un incendio en Galicia 3 años antes del comienzo del estudio, se evaluó el efecto del triturado de arbolado no comercial o restos de corta en el contenido de humedad de la vegetación, restos triturados y suelo mineral, en función de la exposición.

Se determinaron los efectos de los restos triturados de arbolado quemado no comercial, en parámetros de la vegetación y el suelo. Para ello, en el área afectada por el incendio de As Neves (Pontevedra) en 2017 se analizaron pinares de 20 años quemados. Tras el incendio se efectuó su corta y los restos de esta operación se extrajeron o trituraron in situ,

En la Zona NO de España, Zona Centro de España y Sur de España, se vienen realizando seguimientos de humedad del combustible vivo en diferentes formaciones de *Ulex europaeus*, *Erica australis* y *Pteridium aquilinum* (NO de España, ver comunicación del presente congreso ALONSO-REGO et al. 2022); *Pinus sylvestris*, *Cistus ladanifer* (Centro de España); *Pinus pinea*, *Pinus pinaster*, *Quercus suber* (S de España) (MARINO et al 2020). Estas bases de datos tienen un valor añadido en sí mismas por la falta de información sobre humedad de combustibles vivos y dificultad de disponer e series largas de esa variable. Además están sirviendo para correlacionar y validar las estimaciones procedentes de sensores remotos.

Para dar generalidad a los modelos de humedad-inflamabilidad de combustibles muertos en un contexto de cambio climático se usaron resultados de experimentos con diferentes condiciones de exclusión de lluvia (dispositivo CLIMED, Sur de Francia) en masas de *Pinus halepensis* y *Quercus pubescens*. En dichas experiencias se muestra cómo la exclusión de precipitación continuada en ecosistemas mediterráneos puede hacer aumentar la inflamabilidad de los combustibles no sólo por los menores contenidos de humedad sino por los cambios producidos en la composición química, como la aparición de ceras en las cutículas de las hojas. (ORMEÑO et al. 2020).

4.2. Influencia de tratamientos preventivos en los componentes de la vulnerabilidad

En el dispositivo experimental de Edreiras (NO de España) en el que se habían aplicado tratamientos preventivos de quema prescrita, desbroce y trituración en 2010, se evaluaron características de los combustibles, la cobertura y biodiversidad vegetal y las propiedades del suelo 9 años después de los tratamientos. Además, se realizó un seguimiento de los parámetros citados después de la aplicación de un nuevo tratamiento de trituración. Se utilizó láser terrestre y RPAS (drones) para la evaluación de los combustibles y se exploró su uso para evaluar el grado de consunción de los mismos por el nuevo tratamiento. Adicionalmente, mediante inventario de campo y los datos de ultra-alta resolución registrados por RPAS se realizó un seguimiento del efecto del fuego de baja intensidad sobre la reducción del combustible y la recuperación de la vegetación en una zona de montaña de Lugo (Robledo do Son) sometida a tratamientos repetidos de fuego prescrito.

En la Zona SE de España se instalaron nuevos dispositivos experimentales en diversos lugares del sur de Castilla-La Mancha (Ayna-Molinicos). Se llevaron a cabo quemas prescritas con similares

intensidades de quema y replicando los estudios de efectos sobre suelo y vegetación llevados a cabo en GEPRIF (www.proyectogeprif.es) (indicadores biológicos de calidad de suelo, hidrofobicidad, infiltración, respuesta de vegetación) para conocer el efecto de la recurrencia en la interfaz planta-suelo en estos ecosistemas. Con estos datos se amplía la información obtenida en proyectos anteriores en masas de *Pinus nigra* y *Pinus pinaster* a ecosistemas dominados por *Pinus halepensis* en relación a combustibles, propiedades y respiración de suelo y desfronde.

Se usaron parcelas de quema prescrita del Plan Nacional de Quemas prescritas (MITECO-TRAGSA) en la provincia de Soria en masas de *P. pinaster*. Se realizaron 3 tratamientos: quema prescrita, resinación, quema+resinación y testigo. Se evaluó el efecto de las quemas prescritas combinadas con la resinación para prevenir incendios y aumentar la producción de resina. Los resultados mostraron que la quema redujo significativamente la carga de combustible sin afectar al estado de la masa ni a la producción de resina (más detalles en comunicación de este congreso MADRIGAL et al. 2022). Se usó también el dispositivo experimental mencionado para evaluar el efecto de las quemas prescritas en las poblaciones de escolítidos. Se planteó un trampío de *Ips sexdentatus* donde se localizaron zonas quemadas en diferentes cronosecuencias tras las quemas para evaluar el efecto de las quemas en la población de esta especie, causante de plagas importantes. Se testó la hipótesis de si el aumento potencial de estos insectos tras las quemas haría a las masas más vulnerables a plagas. No se detectó un efecto significativo del tratamiento de quema en las poblaciones de escolítidos para las diferentes cronosecuencias de quema y distancias a áreas sin quemar.

Por primera vez se desarrollan una serie de experimentos con fuego de alta intensidad en el S de España para mejorar y modelizar el dimensionamiento de tratamientos lineales basados en monitoreo de campo. En la aplicación de esta metodología, se utilizaron drones dotados de cámaras para el monitoreo, en visible e infrarrojos, de la dinámica de la propagación del fuego. De igual modo se empleó una red de radiómetros para registrar la energía procedente de los frentes de llamas en los bordes de contacto donde se han realizado los tratamientos preventivos. Como innovación metodológica se incorporó la medición del calor de convección que se registra en el dosel arbóreo para cuantificar la vulnerabilidad de las copas de los árboles y de los combatientes en las operaciones de extinción mediante el uso de drones dotados de sensores térmicos, termopares en altura y radiómetros usando pétigas telescopicas. Los resultados han permitido dimensionar las infraestructuras usando el límite de 7 kW/m² de radiación máxima admisible para el trabajo seguro en la línea de control. Se ha desarrollado la aplicación de móvil AppSLPD para el cálculo rápido del dimensionamiento por parte de los gestores.

Se efectuó un estudio de revisión del nivel de cocimiento actual sobre el efecto de las quemas prescritas repetidas en las propiedades del suelo, para: (1) identificar las respuestas comunes de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo y de la mesofauna del suelo, causadas por las quemas prescritas repetidas y (2) detectar las lagunas de conocimiento, sugiriendo temas de investigación para ayudar a entender el papel de la frecuencia de los incendios prescritos de baja severidad en el suelo (FONTURBEL et al., 2021).

4.3. Influencia de la severidad, recurrencia de incendios e interacción de perturbaciones en la resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas forestales

En zonas de transición de clima semiárido y mediterráneo (SE de España) y en zonas de clima atlántico y transición mediterránea (NO de España) se estudiaron los efectos de la recurrencia de incendios sobre la estructura y composición de las masas forestales, mediante el uso de técnicas de teledetección. Se analizaron los valores dinámicos de NDVI para valorar la evolución del estado de la vegetación en áreas incendiadas varias veces en pinares de *Pinus halepensis*, *P. pinaster* y *P. nigra*.

En la Zona Mediterránea del Sur de España se determinaron los efectos de la recurrencia de incendios sobre la estructura de los combustibles y respuesta del paisaje, mediante el uso de la geodatabase de los incendios de superficie de más de 150 ha registrados en Andalucía desde 1985. Empleando índices de ecología del paisaje se realizaron análisis de la evolución de la cobertura postincendio y de los efectos de solapes de huella de incendios multitemporales y por efectos de la recurrencia.

Se realizó un estudio a escala de laboratorio para determinar la influencia de los daños bióticos (enfermedades) en la inflamabilidad de diferentes partes de la planta. Se usaron plantas seleccionadas de *Cupressus sempervirens* resistentes e infectadas con *Seiridium cardinale* como fase preliminar a extender estos estudios a especies autóctonas españolas. Se realizaron analíticas de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) para explorar los grupos de dichos elementos que exacerbaban la inflamabilidad de plantas infectadas (DELLA ROCCA et al. 2020). Los resultados mostraron que el aumento de inflamabilidad de plantas infectadas se debe en mayor medida a la aparición de partes muertas en la planta que al aumento de producción de VOCs como consecuencia de la infección (respuesta de defensa secundaria de la planta). Esto sugiere que la interacción patología-inflamabilidad podría incrementar la inflamabilidad de las plantas por aumento de la proporción de partes muertas.

Se ha ampliado la base de datos de caracterización de la inflamabilidad y resistencia al fuego de cortezas obtenida en GEPRIF (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. suber*) incluyendo otras especies de pino (*P. pinea*, *P. halepensis*, *P. sylvestris*), de quercíneas (*Q. pyrenaica*, *Q. ilex*) y de cupresáceas (*C. sempervirens*, *J. thurifera*). Los datos de laboratorio se validaron en campo en quemas prescritas (ESPINOSA et al. 2020) y se exploró el uso del modelo de utilidad propio para complementar las medias mediante métodos no destructivos (más información en comunicación MADRIGAL et al. 2022). También se puso a punto una nueva metodología para caracterizar la apertura de las piñas serótinas de *P. halepensis* (MADRIGAL et al. 2020) que advierte sobre los límites de intensidad de reacción necesarios para la apertura del banco aéreo durante la ejecución de quemas prescritas.

Como caso paradigmático de las especies resistentes se evaluó el efecto de la resistencia al fuego de *Quercus suber*. La toma de datos se realizó en tres niveles: en parcelas seleccionadas en áreas afectadas por incendios, en fuegos experimentales diseñados en el contexto del proyecto y en ensayos de probetas en laboratorio. Los resultados confirman la alta resistencia de esta especie al fuego pero la vulnerabilidad de los bornizos de árboles jóvenes y corchos de reproducción de las primeras edades del turno con grosor inferiores a 2 cm.

Se instaló un nuevo dispositivo experimental en las mismas áreas del proyecto GEPRIF (Cuenca, Figura 3). El objetivo fue realizar quemas de alta severidad para evaluar la vulnerabilidad real de las masas puras de *Pinus nigra* y mixtas de *P. nigra-P. pinaster* a incendios de superficie. Los resultados muestran la gran diferencia con los resultados obtenidos en quemas de primavera para los efectos en el suelo y arbolado (más detalles en la comunicación JIMÉNEZ et al. 2022)

Se analizó el efecto a corto plazo de la severidad del fuego en distintas fracciones de materia orgánica (MO) del suelo (MO libre, MO ocluida y MO asociada a minerales y de diferentes fracciones de tamaño de partícula). El estudio se realizó en suelos del NO de España, de un área de *P. pinaster* y de dos áreas de brezales secos recientemente quemados. Se encontró que la severidad del fuego produjo importantes pérdidas de las tres fracciones de densidad de la MO, especialmente de la MO libre y reducciones de la repelencia al agua del suelo y del tamaño de los agregados del suelo (MERINO et al.,2021).

Se realizó un seguimiento de los efectos en el medio/largo plazo de dos severidades de incendio llevadas a cabo en lisímetros de pesada de monolitos forestales situados en la planta piloto MedFOREtron de la UCLM para evaluar la vulnerabilidad de zonas no arboladas del SE de la Península Ibérica. Se obtuvieron resultados de alto impacto destacando la importancia de la severidad de fuego en diferentes parámetros del suelo (LUCAS-BORAJ et al. et al. 2019)

4.4. Mejora de la predicción del comportamiento del fuego para reducir la vulnerabilidad de las masas forestales

Se ha puesto a punto una nueva metodología para la planificación y cálculo de Perímetros de Cuencas Operaciones de Extinción (PODs) en S de España, que ha dado lugar a una tesis doctoral. El objetivo del diseño del mapa de PODs, es generar una reducción de la incertidumbre, basada en la maximización del cambio neto en el valor económico de los recursos naturales (incremento del valor salvado y por consiguiente reducción de la vulnerabilidad derivada), con una minimización de los costes de extinción, teniendo en consideración los escenarios operacionales en el marco de la dificultad de extinción.

Se monitorizaron las parcelas de quema de los dispositivos del proyecto para hallar modelos estadísticos de predicción del comportamiento del fuego. También se ha modelizado la velocidad de propagación condicionada a las principales técnicas de encendido (influencia en el número y separación de las líneas de encendido) con el fin de relacionar el sistema de encendido empleado con la menor vulnerabilidad en copas por la energía térmica ascensional (“poda térmica”) y rendimiento de la quema para el cumplimiento de objetivos.

Se ha ampliado la base de datos del proyecto GEPRIF para la parametrización del viento y la propagación por copas para mejora de modelos de comportamiento del fuego y se añadieron nuevos análisis de los incendios producidos en las campañas 2018-2022, así como de los sitios de quemas experimentales llevadas a cabo. De forma complementaria se realizaron fuegos experimentales y maquetas de 50mx50m, para realizar ajustes en los coeficientes del modelo y evaluar la transmisión energética entre copas. El uso de radiómetros y termopares localizados en las copas, mediante pértigas telescopicas, permitió monitorear la transmisión energética entre copas, con lo que se ha podido relacionar la magnitud de estas transmisiones, con el estado dasonómico de la masa.

4.5. Análisis económtrico de la vulnerabilidad

Se generaron un conjunto de ecuaciones predictoras de costes de ejecución de quemas prescritas en función de las variables generales y la incorporación de nuevas variables que caractericen los escenarios tipificados de quemas. (Equipo UCO). Estos costes se han programado e incluido en la aplicación AppCFP.

Considerando la frontera estocástica (procedimiento que incorpora la influencia de factores que reducen la eficiencia) se realizó la determinación de funciones de producción para la obtención de rendimientos y cambio en el valor neto de los recursos afectados por incendios por grupos diferenciados de tipos de incendios. Se seleccionó la información contenida en 800 incendios de la base de datos del Plan INFOCA de Andalucía. Se han testado tres modelos y los resultados se han incorporado al simulador VisualSeveif.

Modelización procedural que permitirá mediante la fusión de herramientas geoestadísticas y económtricas, generar la metodología que mediante cuantificación de los efectos combinados del comportamiento energético del fuego y las oportunidades de extinción, determine los gradientes diferenciales a escala de paisaje de las oportunidades de extinción. Se ha empleado como ratio

evaluador el SDI (índice de dificultad de extinción, RODRÍGUEZ y SILVA et al. 2020) una nueva aportación internacional que permite ajustar adecuadamente análisis econométrico espacial de la dificultad de extinción en el territorio

4.6. Efectividad de tratamientos para la restauración post-incendio y de su influencia en la vulnerabilidad

Se evaluó la capacidad de distintas metodologías basadas en sensores remotos (LiDAR y correlación superdensa basada en imagen PNOA y DRON) para la detección de zonas con distintos niveles erosivos tras incendios en Galicia y Albacete. Se evaluó la eficacia de las actuaciones de corrección hidrológica orientadas a protección del suelo ejecutadas para el control de la erosión: a) Diques y albaradas, b) Saca de madera quemada, c) mulching. Se realizó una evaluación de su eficacia en relación a la recuperación/pérdida del suelo (calidad y cantidad) y vegetación (biodiversidad y cantidad). (LUCAS-BORJA et al. 2020)

Se evaluó el efecto a medio plazo (5 años) del tratamiento de mulching en parcelas de matorral instaladas después de incendios forestales en el NO de España sobre la cobertura, diversidad vegetal y biomasa. Las características del lugar afectaron significativamente al complejo de vegetación, pero la severidad del fuego en el suelo no tuvo ningún efecto residual. Los resultados del estudio indican que el helimulching con paja tiene efectos neutros sobre la cobertura y composición de la vegetación en los matorrales analizados. (FERNÁNDEZ 2021)

Se llevó a cabo una experiencia piloto con las quemas realizadas en la planta piloto MedFOREcotron para relacionar severidad de incendio, respuesta radiométrica de cenizas y composición química que pretende ser base de validación para mediciones en sensores aéreos no tripulados. Se realizó un muestreo en zonas afectadas por incendios con distinta severidad. Se recogieron muestras para calcular la densidad aparente de las cenizas generadas, y se relacionarán con índices obtenidos a partir de teledetección – dNBR, RdNBR y otros a explorar, con el objetivo de evaluar la disponibilidad de suelo a ser erosionado en esas zonas.

Se evaluó el efecto de la saca de madera en la vegetación y propiedades edáficas a medio plazo en el Rodenal de Guadalajara (tesis doctoral en curso). Se evaluó en Galicia el efecto de la saca de la madera en combinación o no con la aplicación de mulching sobre las pérdidas de suelo por erosión, recuperación de la cobertura vegetal y propiedades físicas del suelo en masas arboladas afectadas por incendios. Se evaluó el efecto de la saca de madera en la interfaz suelo-planta, incluyendo posibles efectos de facilitación de germinadoras/rebrotadoras, dependiendo del momento de saca de madera muerta tras el incendio (menos de un año tras incendio) o tardío (al menos después del segundo verano) en dos incendios del SE de Albacete (Hellín y Lietor) que están al borde del clima Mediterráneo semiárido.

Se evaluaron los efectos de la mezcla comercial de “microorganismos efectivos” (EM) y de inóculos del hongo *Trichoderma* spp., en combinación o no con el tratamiento de mulching, aplicado después de dos incendios en Galicia, en parámetros del suelo y vegetación. Hubo una respuesta positiva temporal de algunas propiedades del suelo a estos tratamientos. Fueron factores influyentes en la respuesta, el momento de la aplicación y las condiciones meteorológicas posteriores.

Mediante una aproximación metagenómica se analizó la influencia a corto plazo de la severidad del fuego y del tipo de vegetación afectada (*Pinus radiata* y matorral de *Ulex europaeus*) en el microbioma del suelo. Se identificaron cambios en la diversidad y composición de la comunidad bacteriana del suelo en función de la severidad del fuego. En los suelos quemados, hubo un enriquecimiento con bacterias capaces de degradar compuestos aromáticos policíclicos y otras moléculas orgánicas recalcitrantes a la descomposición. Estos microorganismos pueden ser

beneficiosos para la eliminación de los compuestos recalcitrantes generados por combustión durante el incendio.

Para realizar una valoración del uso de planta micorrizada en repoblaciones forestales (restauración activa) sobre servicios ecosistémicos, principalmente aumento del valor de los productos, propiedades edáficas y resiliencia de los suelos frente al impacto del incendio, se efectuó una plantación de plántulas de pino carrasco y pino negral micorrizados con *Lactarius deliciosus* a partir de inóculo comercial en los 6 monolitos de la unidad experimental MedForECOTRON, con el fin de evaluar la influencia de dos intensidades de quema sobre la evolución de la infección micorrícica presente. Los resultados han sido evaluados con un “rizotró” y permiten caracterizar adecuadamente la micorrización en niveles contrastados de severidad.

5. Discusión

Parte de los resultados descritos no tienen aplicación directa a corto plazo y será necesario seguir investigando al respecto. No obstante, VIS4FIRE tenía previsto generar productos de aplicación práctica transferible al sector, algunos de ellos actualmente en fase de implementación:

- 1) Cartografía de modelos de combustible dinámicos: mediante la integración de la componente estructural de los combustibles y su disponibilidad en base a la evolución estacional del contenido de humedad. Mediante modelos espacio-temporales (Co-kriging) y datos de variación de humedad de combustibles vivos, se pueden generar combustibles dinámicos a diferentes escalas espaciales y temporales. Se están validando los resultados en zonas piloto del centro de España situadas en la provincia de Segovia y la Comunidad de Madrid, incluyendo el Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, así como en Sierra Morena (Córdoba). Los modelos dinámicos ofrecerán información adicional respecto a las cartografías disponibles actualmente, ya que permitirán estimar el combustible real disponible en caso de incendio, ofreciendo por tanto una métrica de la vulnerabilidad espacio-temporal de las masas forestales.
- 2) Evaluación de vulnerabilidad por pérdidas de suelo basada en sensores remotos. Desarrollo de una metodología basada en sensores remotos para evaluación de la vulnerabilidad por pérdida de suelo tras incendio en ecosistemas semiáridos mediterráneos. El prototipo desarrollado permitirá evaluar las pérdidas de suelo en base a estas tecnologías. La herramienta incluirá una guía de recomendación coste-beneficio de las principales actuaciones de corrección hidrológico-forestal aplicable por los gestores para optimizar inversiones orientadas a la protección del suelo tras episodios de incendio forestal.
- 3) Herramienta de evaluación de vulnerabilidad de troncos basada en estudios de laboratorio, quemas prescritas e incendios. Se implementarán los modelos obtenidos para caracterizar la resistencia al fuego debida a la corteza de las principales especies de coníferas mediterráneas. La inclusión de modelos de perfil de corteza permitirá su uso en la planificación de quemas prescritas y en la predicción temprana de la mortalidad tras incendios en especies con alta resistencia al fuego.
- 4) Herramienta de vulnerabilidad económica: VISUAL-SEVEIF-VIS4FIRE. La plataforma de última generación del software Visual-Seveif, permite que ya en la actualidad y procedentes de los avances recogidos, incluya herramientas de evaluación del peligro potencial de ocurrencia de incendios y evaluación tanto de los valores económicos perdidos, como salvados de los recursos naturales afectados por efecto de los incendios.

La integración de estos resultados no es inmediata, máxime si se quiere ofrecer una herramienta práctica de gestión que solucione los problemas planteados en la Figura 1. Para ello, los productos aplicados de los resultados descritos se implementarán en la aplicación para móviles VIS4FIREApp (PDC2021-120845-C51 Aplicación informática APP de apoyo a la gestión forestal mediante la

reducción de la vulnerabilidad integral de los sistemas forestales frente a los incendios) para la cual se ha conseguido financiación adicional en la convocatoria “Prueba de concepto” 2021 con cargo a los Fondos de Recuperación y Resiliencia.

6. Conclusiones

El ingente trabajo llevado a cabo durante los años 2018-2021 ha generado 5 tesis doctorales, más de 50 artículos científicos, aplicaciones y recomendaciones transferibles al sector. Durante los años 2022-2023 se llevará a cabo la “Prueba de Concepto” VIS4FIREApp que permitirá implementar gran parte de los resultados descritos en una aplicación para dispositivos móviles que evalúe la vulnerabilidad integral del fuego a los ecosistemas forestales ibéricos.

En relación con los objetivos específicos podemos destacar:

- Se han desarrollado nuevas técnicas y modelos para describir la biometría de combustibles forestales, profundizando en la estimación de los modelos de copa, en concreto en las variables CBH, CFL y CBD. La explotación de sensores remotos está suponiendo un avance científico-técnico de alto interés para mejorar la predicción de estas variables.
- Se han obtenido resultados de alto impacto en los efectos del uso del fuego prescrito en los ecosistemas ibéricos, que en general se pueden resumir que este tratamiento disminuye la vulnerabilidad a los incendios y no tiene efectos significativos sobre la mayoría de los parámetros del ecosistema
- La evaluación de la severidad y recurrencia de incendios en la resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas forestales muestra el fuerte impacto que tiene en los ecosistemas ibéricos, tanto más en la zona sureste de España.
- Las quemas de alta intensidad pioneras en España están permitiendo importantes aproximaciones a la predicción del comportamiento del fuego para reducir la vulnerabilidad de las masas forestales
- La definición de índices nuevos como el índice dificultad de extinción o planteamientos novedosos como los perímetro operacionales de defensa (PODs) han ofrecido hitos importantes en la aplicación del análisis estadístico al estudio de la vulnerabilidad en los aspectos relacionados con la capacidad operacional
- Los estudios desarrollados muestran la efectividad de tratamientos para la restauración post-incendio como el mulching y las fajinas y de su influencia en la vulnerabilidad del sistema forestal.

7. Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el proyecto VIS4FIRE INIA-RTA2017-00042-C05, del Programa Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación (Plan Estatal de I + D + I) cofinanciado por FEDER. Los autores dan su agradecimiento a todos los miembros de los equipos de investigación y trabajo de los diferentes subproyectos y las personas que colaboraron en el trabajo de campo y de laboratorio. Agradecemos a todas las administraciones forestales de las CCAA, Ayuntamientos y Gobierno central que han facilitado el desarrollo de los experimentos y las redes de parcelas.

8. Bibliografía

ALLOZA, J.A.; GARCÍA, S.; GIMENO, T.; BAEZA, J.; VALLEJO, V.R.; ROJO, L.; MARTÍNEZ, A. 2014. Guía técnica para la gestión de monte quemados con riesgo de desertificación. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.

ALONSO REGO, C.; ARELLANO PÉREZ, S.; RUÍZ GONZÁLEZ, A.D.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G.; LÓPEZ FERNÁNDEZ, M.; ROMAY RÍO, M.F.; Variación de la humedad de los combustibles finos vivos en formaciones de matorral con predominio de *Erica australis* y *Pterospartum tridentatum* en la montaña oriental de Lugo. 8 CFE. Lleida, 27 junio-1 julio.

ALONSO-REGO, C.; ARELLANO-PEREZ, S.; CABO, C.; ORDOÑEZ, C.; ÁLVAREZ-GONZALEZ, J. G.; DÍAZ-VARELA, R. A.; RUIZ-GONZÁLEZ, A. D.; 2020. Estimating fuel loads and structural characteristics of shrub communities by using terrestrial laser scanning. *Remote Sensing*, 12(22), 3704

ARELLANO-PEREZ, S., CASTEDO-DORADO, F., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G., ALONSO-REGO, C., VEGA, J.A., RUIZ-GONZALEZ, A.D. (2020). Mid-term effects of a thin-only treatment on fuel complex, potential fire behaviour and severity and post-fire soil erosion protection in fast-growing pine plantations. *For. Ecol. Manag.* 460, 117895.

DELLA ROCCA, G.; DANTI, R.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; MICHELOZZI, M.; CARRILLO, C.; MADRIGAL, J. 2020. Linking disease and flammability focusing in terpenoids induced accumulation: a laboratory study on the common cypress-cypress canker disease pathosystem. *Forests*. Doi: 10.3390/f11060651

ESPINOSA, J.; MADRIGAL, J.; PANDO, V.; DE LA CRUZ, A.C.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C. 2020. The effect of low-intensity prescribed burning in two different seasons on litterfall biomass and nutrient content. *International Journal of Wildland Fire*. Doi: 10.1071/WF19132

FERNÁNDEZ, C. 2021. Medium-term effects of straw helimulching on post-fire vegetation recovery in shrublands in north-west Spain. *Int J Wild Fire* 30: 301-305

FERNÁNDEZ, C.; FONTÚRBEL, T.; VEGA, J.A. 2021. Cumulative effects of salvage logging and slash removal on erosion, soil functioning indicators and vegetation in a severely burned area in NW Spain. *Geoderma* 393:115004.

FONTÚRBEL, T.; CARRERA, N.; VEGA, J.A.; FERNÁNDEZ, C. 2021. The Effect of Repeated Prescribed Burning on Soil Properties: A Review. *Forests* 12, 767.

JIMÉNEZ, E.; VEGA, J.A.; FONTURBEL, T.1; ESPINOSA, J.; DE LA CRUZ, A.C; DÍEZ, C.; CARRILLO, C.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C.; MATEO, J.F.; ALMODOVAR, J.; MADRIGAL, J. 2022. Impacto térmico y reducción de hojarasca y mantillo por quemas experimentales en condiciones de peligro alto de incendios en pinares de *Pinus nigra* y *P. pinaster*. VII Congreso Forestal Español. Lleida. 27 junio-1 julio

LUCAS-BORJA, M.E.; MIRALLES, I.; ORTEGA, R; PLAZA-ÁLVAREZ, P.A.; GONZALEZ-ROMERO, J.; SAGRA, J.; SORIANO-RODRÍGUEZ, M.; CERTINI, G.; MOYA, D.; HERAS, J. 2019. Immediate fire-induced changes in soil microbial community composition in an outdoor experimental controlled system. *Science of the Total Environment* 696, 134033

LUCAS-BORJA, M.E.; PLAZA-ÁLVAREZ, P.A.; GONZÁLEZ-ROMERO, J.; MIRALLES, I; SAGRA, J.; MOLINA-PEÑA, E.; MOYA, D.; DE LAS HERAS, J.; FERNÁNDEZ, C. 2020. Post-wildfire straw

mulching and salvage logging affects initial pine seedling density and growth in two Mediterranean contrasting climatic areas in Spain. *Forest Ecology and Management* 474, 118363

MADRIGAL, J.; CARRILLO GARCÍA, C.; RODRÍGUEZ, A.; DOMÍNGUEZ, J.; SAN QUIRICO, A.; GONZÁLEZ, D.; GUIJARRO, M.; DÍEZ, C; ESPINOSA, J.; LÓPEZ-SANTALLA, A.; HERNANDO, C. 2022. O Influencia de las quemas prescritas como tratamiento previo a la producción de resina en pinares de *Pinus pinaster*. VII Congreso Forestal Español. Lleida. 27 junio-1 julio

MADRIGAL, J.; CARRILLO, C.; ESPINOSA, J.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C.; DÍEZ, C.; DE LA CRUZ, A.C.; MATEO, J.F.; ALMODOVAR, J.; SANTOS, P.F.; JIMÉNEZ, E.; VEGA, J.A.; FONTURBEL, T.; GONZÁLEZ-ADRADOS J.R. 2022. Aplicaciones del modelo de utilidad "ES 1224321" para evaluar la supervivencia de tejidos vivos bajo la corteza de los árboles: supervivencia del felógeno (*Quercus suber*) y el cambium (*Pinus nigra*) expuestos al fuego. VII Congreso Forestal Español. Lleida. 27 junio-1 julio

MADRIGAL; J.; HERNANDO; C.; GUIJARRO; M.; 2011. La gestión post-incendio como apoyo a la regeneración natural y a la restauración tras el gran incendio del Rodenal de Guadalajara: efectos sobre la supervivencia y crecimiento de los brizales de *Pinus pinaster* Ait. *Spa J Rur Dev II* (3): 1-14

MADRIGAL, J.; MARTÍN, A.; CHAMBEL, R.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C.; CALLEJAS, M.; ESPINOSA, J.; CLIMENT, J. 2020. Do cone age and heating mode determine the opening of serotinous cones during wildfires? A new bench scale approach applied to *Pinus halepensis* Mill. *Science of the Total Environment*. 763:144222

MADRIGAL, J.; ROMERO-VIVO, M.; RORIGUEZ Y SILVA, F. 2019. Definición y recomendaciones técnicas en el diseño de puntos estratégicos de gestión. "Decálogo de Valencia" para la defensa integrada frente a los incendios en la gestión del mosaico agroforestal. Sociedad española de ciencias forestales (SECF), Generalitat Valenciana ISBN: 978-84-941695-4-0

MARINO DEL AMO, E.; TOMÉ MORÁN, J.L; NAVARRO FERNÁNDEZ, J; HERNANDO LARA, C.; GUIJARRO GUZMÁN, M.; MADRIGAL OLMO, J. 2022. Cartografía de alta resolución de combustibles de copas en masas de *Pinus sylvestris* L. a partir de modelos derivados de LiDAR aéreo. VIII Congreso Forestal Español. Lleida. 27 junio-1 julio

MARINO, E.; YEBRA, M.; GUILLEN-CLIMENT, M.; ALGEET, N.; TOMÉ, J.L.; MADRIGAL, J.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C. 2020. Investigating live fuel moisture content estimation in fire-prone shrubland from remote sensing using empirical modelling and RTM simulations. *Remote Sensing*. Doi: 10.3390/rs12142251

MERINO, A.; GARCÍA-OLIVA, F.; FONTÚRBEL, M.T.; VEGA, J.A. 2021. The high content of mineral-free organic matter in soils increases their vulnerability to wildfire in humid-temperate zones. *Geoderma* 395, 115043.

MORI AS. 2015. Resilience in the Studies of Biodiversity–Ecosystem Functioning. *Trends in Ecology & Evolution* DOI: 10.1016/j.tree.2015.12.010

NUNES, L.; MORENO, M.; ALBERDI, I.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G., GODINHO-FERREIRA, P.; MAZZOLENI, S.; CASTRO REGO, F.; 2020. Harmonized Classification of Forest Types in the Iberian Peninsula Based on National Forest Inventories. *Forests*, 11(11), 1170.

ORMEÑO, E.; RUFFAULT, J.; GUTIGNY, C.; MADRIGAL, J.; GUIJARRO. M.; HERNANDO, C.; BALLINI, C. 2020. Increasing cuticular wax concentrations in a drier climate promote litter flammability. *Forest Ecology and Management*. Doi: 10.1016/j.foreco.2020.118242

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; GUIJARRO, M.; MADRIGAL, J.; JIMÉNEZ, E.; MOLINA, J.R.; HERNANDO, C.; VÉLEZ R.; VEGA JA. 2017. Assessment of crown fire initiation and spread models in Mediterranean conifer forests by using data from field and laboratory experiments. *For Syst* DOI: 10.5424/fs/2017262-10652

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; O'CONNOR, C.D.; THOMPSON, M.P.; MOLINA MARTÍNEZ, J.R.; CALKIN, D.E.. 2020. Modelling suppression difficulty: current and future applications. *Int J Wildland Fire* 29(8) 739-751

VEGA, J.A.; ARELLANO-PEREZ, S.; ALVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; FERNÁNDEZ, C.; JIMÉNEZ, E.; FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M.; VEGA-NIEVA, D.J.; BRIONES-HERRERA, C.; ALONSO-REGO, C.; FONTÚRBEL, T.; RUIZ-GONZÁLEZ, A.D. 2022. Modelling aboveground biomass and fuel load components at stand level in shrub communities in NW Spain. *For. Ecol. Manag.* 505, 119926.

VEGA, J.A.; FONTRUBEL, T.; FERNÁNDEZ, C.; ARELLANO, A.; DÍAZ-RAVIÑA, M.; CARBALLAS, M.T.; MARTÍN. A.; GONZÁLEZ-PRIETO, S.; MERINO, A.; BENITO, E. 2013. Acciones urgentes contra la erosión en áreas forestales quemadas. Guía para su planificación en Galicia. Xunta de Galicia. ISBN: 978-84-8408-716-8.