



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1583

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

Organiza





Estimación de modelos de combustible con técnicas de teledetección de base física

FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M. (1), PEÑA, S. (1), MARCOS, E. (1), TÁRREGA, R. (1), MONZÓN, A. (1) y CALVO, L. (1)

(1) Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León, 24071 León, España

Resumen

El conocimiento de la distribución espacial precisa de los combustibles forestales es esencial para evaluar el riesgo y el comportamiento de los incendios, así como para planificar las actividades de gestión. Dependiendo del elemento de propagación del fuego, su altura y la densidad del combustible, el proyecto Prometheus en Europa definió siete modelos de combustible adaptando la clasificación del Northern Forest Fire Laboratory (NFFL) a las características de la vegetación mediterránea. En este trabajo se propone una nueva metodología basada en técnicas de teledetección con base física, como el análisis de mezclas espectrales de múltiples miembros finales (MESMA) y modelos de transferencia radiativa (RTM) aplicadas a datos multiespectrales (Sentinel-2), junto con el cálculo de nuevas métricas de datos radar (Sentinel-1) y LiDAR, para estimar la distribución horizontal y vertical de los rasgos biofísicos y estructurales de la vegetación como proxy de los modelos de combustible Prometheus. Esta metodología ha sido calibrada y validada con un extenso conjunto de inventarios de campo ($n = 215$) de modelos de combustible Prometheus en el noroeste de la Península Ibérica. La precisión global obtenida a partir de un conjunto de datos independiente fue del 91%, mientras que la precisión del usuario y del productor para cada modelo de combustible fue mayoritariamente superior al 80%.

Palabras clave

Lidar, mesma, prometheus, riesgo de incendio, satélite.

1. Introducción

La cartografía de modelos de combustible es esencial para predecir el comportamiento del fuego (ELLSWORTH et al., 2022). Un modelo de combustible se define como la asociación identificable de elementos combustibles que presentan formas, tamaños y distribuciones similares, con un comportamiento predecible bajo condiciones de combustión definidas (BENALI et al., 2017). Existen distintas clasificaciones, siendo las más conocidas las desarrolladas en Norteamérica, como la de Anderson (ANDERSON, 1982), la del Northern Forest Fire Laboratory (NFFL; ALBINI, 1976), y el Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP; VAN WAGNER et al., 1990). El sistema Prometheus (RIAÑO et al., 2002) se basa en el NFFL y adapta sus categorías a los ecosistemas forestales del sur de Europa. Este sistema distingue siete modelos básicos (FT1 a FT7), agrupados según el elemento propagador del fuego: herbáceo (FT1), arbustivo (FT2, FT3, FT4) y arbóreo (FT5, FT6, FT7).

La caracterización y cartografía de modelos de combustible se ha abordado mediante datos de campo, fotointerpretación de imágenes aéreas y, más recientemente, con técnicas de teledetección (HUESCA et al., 2019). Los métodos basados únicamente en datos de campo, aunque precisos, suelen presentar limitaciones por su alto coste y la dificultad de abarcar grandes extensiones (VIEDMA et al., 2020). En este sentido, la teledetección se ha consolidado como una



herramienta clave en la cartografía de modelos de combustible. Inicialmente, la clasificación de modelos de combustible mediante el uso exclusivo de datos de teledetección pasivos (imágenes multiespectrales e hiperespectrales) estaba basada en análisis a nivel de píxel, como métodos de clasificación supervisada o no supervisada, junto con conocimiento de experto, lo que dificulta capturar la variabilidad espacial en la estructura vertical de los tipos de combustible (CHUVIECO, 2009). La utilización de sensores activos para este fin, como el LiDAR y el radar de apertura sintética (SAR), permiten superar estas limitaciones ya que ofrecen información detallada sobre la densidad de combustible y la estructura vertical de las comunidades (GALE et al., 2021).

Estudios previos han estimado la variabilidad espacial de los tipos de combustible Prometheus utilizando una clasificación en dos fases (p. ej. GARCÍA et al., 2011). En la primera fase, se caracteriza el elemento propagador del fuego utilizando una clasificación supervisada basada en datos de teledetección pasivos. En la segunda fase, se aplican reglas de decisión o modelos de aprendizaje automático para asignar un tipo de combustible dentro de cada elemento propagador del fuego previamente asignado, utilizando típicamente datos LiDAR. Esta aproximación, aunque ha permitido caracterizar de forma relativamente precisa los tipos de combustible Prometheus, carece de base física y su capacidad de generalización, aunque no evaluada, puede no ser satisfactoria.

Los modelos de mezclas espectrales (SMA) se han aplicado exitosamente en la evaluación del impacto ecológico de incendios forestales (QUINTANO et al., 2013) o en la evaluación de la diversidad de hábitats (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2021) para evaluar la fracción subpíxel de cada tipo de cobertura del terreno. Por su parte, el método SMA de múltiples miembros finales (MESMA; ROBERTS et al., 1998) es especialmente útil para considerar la variabilidad espectral dentro de cada clase de interés y por tanto la variabilidad natural del terreno. En este sentido, MESMA descompone la reflectancia de cada píxel utilizando diferentes combinaciones de tipos de cobertura potenciales, superando la limitación del SMA tradicional relacionada con la utilización del mismo número de tipos de cobertura para modelizar cada uno de los píxeles, independientemente de si los tipos de cobertura del terreno están representados en el píxel. Dado que el sistema Prometheus define el elemento propagador del fuego, en la primera fase de clasificación, según la fracción de cobertura de especies herbáceas, arbustivas o arbóreas, entre otros parámetros, MESMA presenta un sentido físico y un potencial más alto para estimar la fracción de cobertura que los métodos tradicionales de clasificación utilizados hasta ahora para este fin.

Por otra parte, la mayoría de estudios hasta la fecha han utilizado mapas de vegetación a escala gruesa o conjuntos de métricas LiDAR altamente correlacionadas para estimar el tipo de combustible en la segunda fase del sistema Prometheus, lo que puede dificultar el desarrollo de modelos robustos y transferibles (BOUVIER et al., 2015). Recientemente, KAMOSKE et al. (2019) y VIEDMA et al. (2024) han propuesto nuevos métodos para analizar la distribución de la densidad de área foliar (LAD) y el índice de área foliar (IAF) a lo largo de las capas verticales de combustible a partir de datos LiDAR. A pesar de la utilidad de



estos métodos para estimar la continuidad horizontal y vertical del combustible, incluyendo la presencia de discontinuidades de combustible y su profundidad en las masas forestales, no se han utilizado previamente en la literatura de ecología del fuego para analizar su contribución relativa en la modelización de tipos de combustible.

2. Objetivos

En este estudio, se propone una metodología a escala piloto que integra MESMA, nuevas métricas LiDAR, datos SAR y variables biofísicas de la vegetación, como la fracción de cobertura vegetal, para evaluar su potencial en la cartografía de modelos de combustible en ecosistemas mediterráneos con alta susceptibilidad al fuego.

3. Material y métodos

3.1. Área de estudio y datos de campo

La zona de estudio está situada en la Sierra de la Culebra, una zona propensa a la ocurrencia de incendios extremos localizada en el noroeste de la Península Ibérica (Figura 1). La zona comprende altitudes entre 1000-1200 m, y su topografía es compleja, con crestas pronunciadas y amplios fondos de valle. El clima es Mediterráneo con inviernos fríos y 2-3 meses de sequía estival. La vegetación está dominada por plantaciones forestales de pino marítimo (*Pinus pinaster* Ait.) y pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), bosques autóctonos dominados por rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.) y encina (*Quercus ilex* L.), matorrales dominados por *Erica australis* L., *Halimium lasianthum* subsp. *alyssoides* (Lam.) Greuter, *Pterospartum tridentatum* (L.) Willk. y *Cistus ladanifer* L., así como pastizales mediterráneos.

Entre junio y agosto de 2024 se establecieron 215 parcelas de 20 m × 20 m dentro del marco de estudio, cubriendo variaciones estructurales y en el tipo de vegetación. Se midieron las variables indicadas en el sistema Prometheus (cobertura de especies herbáceas, arbustivas y arbóreas, sus alturas medias, y la continuidad del combustible entre el sotobosque y arbolado si está presente) en subparcelas de 2 m × 2 m. Estos datos se promediaron a nivel de parcela y se asignó el tipo de combustible Prometheus (FT1-FT7). Las parcelas se georreferenciaron con un receptor GPS subcentimétrico.

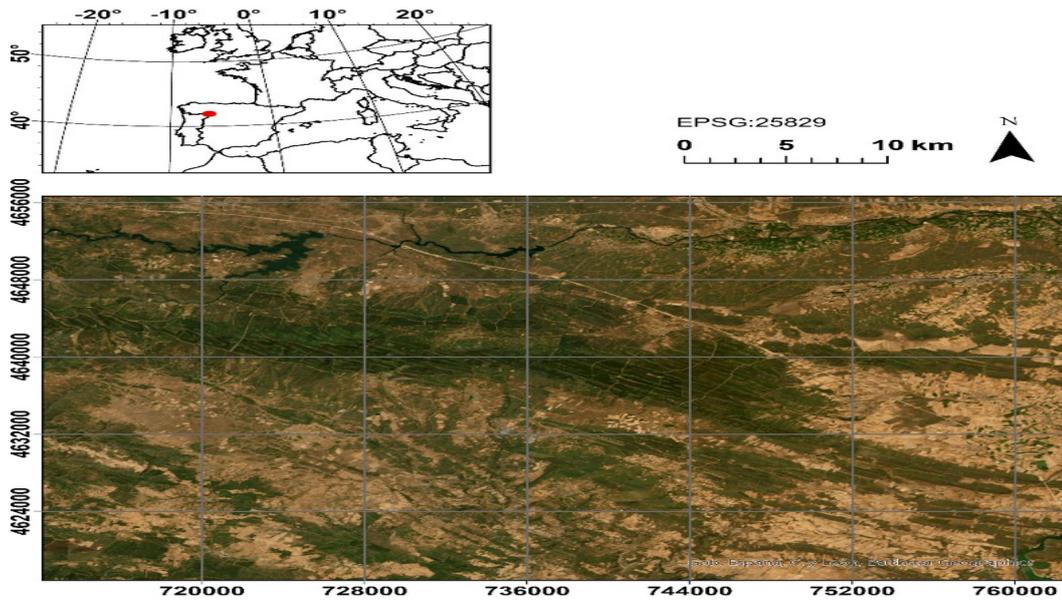


Figura 1. Localización de la zona de estudio (Sierra de la Culebra) en el noroeste de la Península Ibérica.

3.2. Datos de teledetección

Una imagen multispectral Sentinel-2 (L2A, resolución espacial de 20 m) fue adquirida en Google Earth Engine (GEE) (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) para la fecha libre de nubes más cercana al momento central del muestreo de campo. La escena fue utilizada en la aproximación MESMA, además de para estimar la fracción de cobertura vegetal (FCOVER) mediante la inversión del modelo de transferencia radiativa (RTM) PROSAIL-D, siguiendo la metodología de FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al. (2021).

Datos SAR de la banda C del satélite Sentinel-1 (producto ground range detected, resolución espacial de 10 m) fueron adquiridos en GEE (“COPERNICUS/S1_GRD”), comprobando que un hubiese precipitaciones en los 7 días previos a la fecha de adquisición de la escena, ya que la humedad afecta a la retrodispersión SAR y puede confundir el efecto de la estructura de la vegetación. A partir de las bandas VH y VV se calculó la relación de polarización cruzada (SAR-CR), que puede ser indicativa de cambios en la densidad de la vegetación y la complejidad estructural a lo largo del tiempo (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2024).

Finalmente, se adquirieron datos LiDAR de la segunda cobertura (2017-2021) del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), con una densidad para la zona de estudio de 2-4 puntos m⁻². Aunque existe un desfase temporal de estos datos respecto al muestreo de campo, no se registraron perturbaciones relevantes entre medias en la zona de estudio. El método de triangulación progresiva TIN de LAsTools se utilizó para clasificar los puntos de suelo y no suelo. A partir del modelo digital del terreno generado a partir de los puntos clasificados como suelo (2 m de resolución), se normalizaron las alturas de la nube de puntos LiDAR y se calcularon varias métricas con relevancia ecológica a un tamaño de píxel de 20 m × 20 m (coincidiendo con la malla Sentinel-2) en LAsTools. La altura media de los retornos (m) se calculó para clasificar el elemento propagador del fuego junto con las imágenes fracción de MESMA. Se calculó la densidad de la nube de puntos (%)



por intervalos de altura ($D < 0,3$ m, $D_{0,3-0,6}$ m, $D_{0,6-2}$ m, D_{2-4} m, y $D > 4$ m) con el objetivo de capturar la disposición vertical de los combustibles siguiendo el sistema de estratos de combustible Prometheus para parcelas donde el matorral o los árboles sirven como principal elemento propagador del fuego (ARROYO et al., 2008). Por último, el índice de complejidad vertical (VCI; VAN EWIJK et al., 2011) se calculó utilizando intervalos de altura uniformes de 0,5 m, sirviendo como indicador de la uniformidad en la distribución del combustible a lo largo del perfil vertical. Además, se calcularon varias métricas basadas en la distribución de LAD ($m^2 m^{-3}$) a lo largo de las capas verticales de combustible con el paquete canopyLazR (KAMOSKE et al., 2019) en R, utilizando vóxeles de 0,5 m alineados espacialmente con la malla Sentinel-2. En particular, las métricas de distribución de LAD pueden desempeñar un papel fundamental en la identificación de capas continuas de combustible (por ejemplo, combustibles en escalera), así como su profundidad y espaciado dentro del dosel (VIEDMA et al., 2024). Entre las métricas calculadas se encuentran el índice de área foliar (LAI; $m^2 m^{-2}$), la rugosidad del dosel (CRUG) como proxy de la heterogeneidad estructural vertical, el área foliar total en la zona eufótica (EUPHLA; m^2), la profundidad de la zona eufótica (EUPHD; m) y el área foliar total en la zona oligofótica (OLIGLA; m^2).

3.3. Caracterización del elemento propagador del fuego

El algoritmo MESMA aplicado a la imagen multiespectral Sentinel-2 se utilizó para obtener imágenes fracción que identifiquen el porcentaje de cobertura de herbáceas, matorral y arbolado dentro de cada píxel, y posteriormente asignar el elemento propagador del fuego. Se construyó una librería espectral Sentinel-2 mediante el apoyo de ortofotografía PNOA de alta resolución, el Mapa Forestal de España a escala 1:25.000 (MFE25) y compuestos en color verdadero Sentinel-2. La librería fue de tipo jerárquico, organizada en varios niveles (nivel 1: no combustible, herbáceas, matorral, arbolado; nivel 2: coníferas, frondosas, etc.). Finalmente, se ejecutó el algoritmo MESMA con restricciones (fracción entre 0-1, $RMSE < 0,025$, $\leq 5\%$ de píxeles no clasificados) para obtener las imágenes fracción, y se normalizaron a partir de la fracción de sombra calculada automáticamente por el algoritmo. Se excluyeron infraestructuras antropogénicas con una máscara basada en la Base Topográfica Nacional (BTN). Para seleccionar el elemento propagador del fuego de cada píxel, se aplicó una regla de decisiones integrando las fracciones MESMA y la altura media de los retornos LiDAR, siguiendo las reglas del sistema Prometheus.

3.4. Modelización de los tipos de combustible Prometheus

Tras clasificar el elemento propagador del fuego, se abordó la asignación específica de cada tipo de combustible dentro del matorral (FT2, FT3, FT4) y arbolado (FT5, FT6, FT7). El modelo FT1 fue asignado directamente al elemento propagador de tipo pasto. El tipo de combustible Prometheus del 70% de las parcelas de campo de matorral y arbolado, seleccionadas aleatoriamente, fue utilizado para calibrar un modelo Random Forest (RF; BREIMAN, 2001) independiente para cada elemento propagador. Los predictores, agregados a nivel de parcela ($20\text{ m} \times 20\text{ m}$), fueron la FCOVER, el SAR-CR y las métricas LiDAR, exceptuando la altura media de los retornos. El valor óptimo del hiperparámetro *mtry* del modelo RF fue determinado mediante validación cruzada. El hiperparámetro *nree* se fijó en 2000 para asegurar estabilidad en las predicciones (PROBST & BOULESTEIX, 2018). Cada uno de los modelos RF se utilizó junto con las capas ráster de los predictores para generar cartografía espacialmente-explicita dentro de cada elemento propagador determinado por MESMA. Finalmente, se fusionó la cartografía de los tipos de



combustible de matorral y arbolado, con el de pasto y las zonas no combustibles de la máscara de la BTN. El 30% restante de las parcelas de campo de matorral y arbolado, junto con el 30% de las parcelas de pasto, seleccionadas también aleatoriamente, fueron utilizadas para evaluar la precisión de la cartografía mediante la precisión global (PG; %), la precisión del productor (PP; %) y la del usuario (PU; %). Los intervalos de confianza de cada métrica se han calculado mediante el método de Wald. Por otra parte, se calculó el índice Kappa como medida de acuerdo de la clasificación global más allá del azar.

4. Resultados

La aproximación con base física propuesta en este trabajo para cartografiar tipos de combustible según el sistema Prometheus proporcionó una alta precisión de acuerdo al conjunto de 64 parcelas de campo independientes de validación, con una PG del 90,63% y un estadístico kappa de 0,89. La Tabla 1 muestra la matriz de confusión obtenida para la clasificación, donde se puede observar que la PP y PU fue del 100% para el FT1, FT2 y FT5. Las clases con una mayor confusión fueron la FT3 y la FT7 (PP y PU > 71%). La precisión en la estimación del FT4 y FT7, los tipos de combustible con un comportamiento potencial del fuego más peligroso, fue notablemente alta (PP y PU > 75%). La Figura 2 representa el mapa final de tipos de combustible para la zona de estudio generado a partir de las fracciones MESMA y las predicciones de los modelos RF.

Tabla 1. Matriz de confusión y métricas de precisión de la clasificación de tipos de combustible del sistema Prometheus evaluada con un conjunto independiente de parcelas de campo (n = 64). La precisión global (PG), así como la precisión del productor (PP) y la precisión del usuario (PU) para cada clase, se presentan con sus respectivos intervalos de confianza (IC) del 95%, calculados mediante el método de Wald.

Tipo de combustible		Verdad-terreno						
		FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT6	FT7
Predicción	FT1	14	0	0	0	0	0	0
	FT2	0	8	0	0	0	0	0
	FT3	0	0	5	1	0	0	0
	FT4	0	0	2	6	0	0	0
	FT5	0	0	0	0	9	0	0
	FT6	0	0	0	0	0	6	1
	FT7	0	0	0	0	0	2	10
	PP	100.00±0%	100.00±0%	71.43±11.07%	85.71±8.57%	100.00±0%	75.00±10.60%	90.91±7.35%
	PU	100.00±0%	100.00±0%	83.33±9.57%	75.00±10.60%	100.00±0%	85.71±8.57%	83.33±9.57%
PG = 90.63±7.41%			Kappa = 0.89					

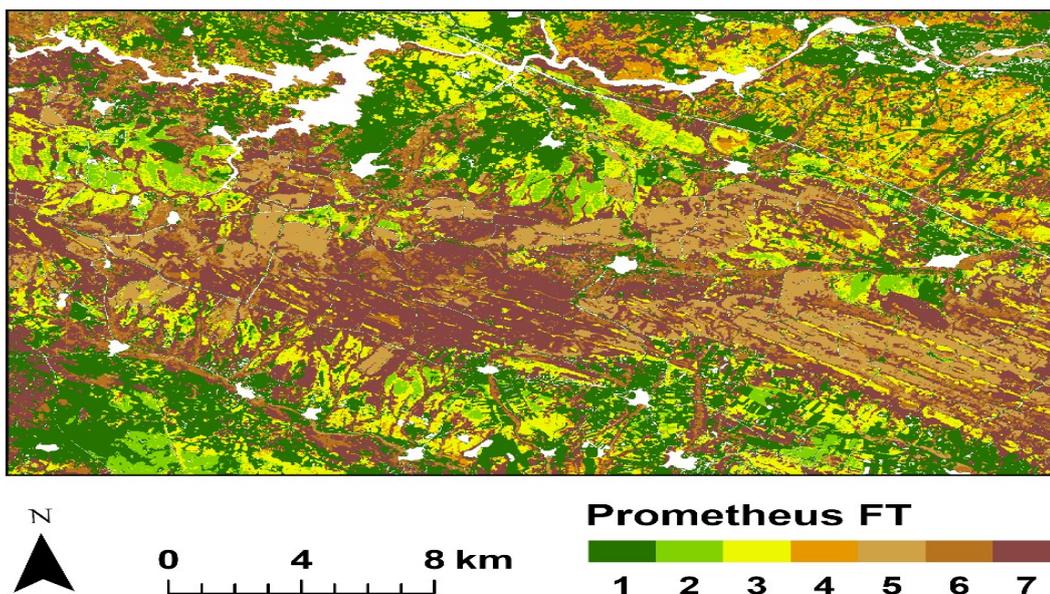


Figura 2. Cartografía del tipo de combustible de la zona de estudio basada en el sistema Prometheus.

5. Discusión

En este trabajo se ha propuesto una nueva metodología para cartografiar el tipo de combustible siguiendo el sistema Prometheus, utilizando datos y técnicas de teledetección con base física. La implementación de métodos de teledetección generalizables resulta fundamental para obtener estimaciones transferibles de las características biofísicas y estructurales de la vegetación a lo largo de paisajes heterogéneos que engloban múltiples tipos de comunidades (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2021), como los de zona de estudio analizada aquí. Esto es especialmente relevante ya que la estimación precisa del tipo y la estructura de los combustibles forestales es clave para proporcionar herramientas de gestión en materia de prevención de incendios de comportamiento extremo (HUESCA et al., 2019).

Nuestros resultados son acordes a estas expectativas. La utilización de técnicas de teledetección con sentido físico y ecológico, y que además se ajustan en gran medida a los descriptores utilizados en campo para estimar el tipo de combustible Prometheus, ha proporcionado una alta precisión en la cartografía desarrollada en este trabajo. De hecho, la precisión global alcanzada en nuestras estimaciones supera a las de estudios previos (59-84%) que han utilizado datos de teledetección activos y pasivos para estimar los tipos de combustible Prometheus en países de la Cuenca Mediterránea (p.ej. LASAPONARA & LANORTE, 2007; DOMINGO et al., 2020; GARCÍA-CIMARRAS et al., 2021; HOFFRÉN et al., 2023). Se espera además que nuestro método sea altamente generalizable a otras zonas de estudio del sur de Europa, lo que debe ser el objetivo de estudios futuros. Además, sería recomendable investigar el potencial de los conjuntos de datos LiDAR de alta densidad de puntos, como los generados por sensores a bordo de vehículos aéreos no tripulados, para determinar si pueden mejorar significativamente la discriminación de tipos de combustible que presentan mayores desafíos en su caracterización, debido a su similitud estructural con otros tipos, como el FT3 y el FT6.

6. Conclusiones



En este trabajo se ha desarrollado una metodología innovadora para la cartografía de tipos de combustible del sistema Prometheus, basada en técnicas de teledetección con fundamento físico y ecológico. Los resultados obtenidos destacan por su alta precisión global (91%) y de cada tipo de combustible (> 70%), y además confirman la relevancia de integrar métricas derivadas de sensores activos y pasivos para caracterizar la estructura y continuidad del combustible forestal. Además, la capacidad de generalización de este enfoque sugiere su aplicabilidad a otros paisajes mediterráneos, representando un avance significativo para la planificación y gestión de incendios extremos.

7. Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España en el marco del proyecto LANDSUSFIRE (PID2022-139156OB-C21), dentro del Programa Nacional de Promoción de la Investigación Científico-Técnica (2021-2023), y con Fondos Next-Generation de la Unión Europea (UE) en el marco del proyecto FIREMAP (TED2021-130925B-I00); así como por la Junta de Castilla y León en el marco del proyecto IA-FIREXTCyL (LE081P23).

8. Bibliografía

- ALBINI, F.A.; 1976. Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-30. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- ANDERSON, H.E.; 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-122. Ogden, Utah: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- ARROYO, L.A.; PASCUAL, C.; MANZANERA, J.A.; 2008. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *For. Ecol. Manag.* 256: 1239–1252.
- BENALI, A.; SÁ, A.C.L.; ERVILHA, A.R.; TRIGO, R.M.; FERNANDES, P.M.; PEREIRA, J.M.C.; 2017. Fire spread predictions: Sweeping uncertainty under the rug. *Sci. Total Environ.* 592: 187–196.
- BOUVIER, M.; DURRIEU, S.; FOURNIER, R.A.; RENAUD, J.P.; 2015. Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. *Remote Sens. Environ.* 156: 322–334.
- BREIMAN, L.; 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 45: 5–32.
- CHUVIECO, E.; 2009. Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems. Springer. 257. Berlin.
- DOMINGO, D.; DE LA RIVA, J.; LAMELAS, M.T.; GARCÍA-MARTÍN, A.; IBARRA, P.; ECHEVERRÍA, M.; HOFFRÉN, R.; 2020. Fuel type classification using airborne laser scanning and Sentinel 2 data in Mediterranean forest affected by wildfires. *Remote Sens.* 12: 3660.
- ELLSWORTH, L.M.; NEWINGHAM, B.A.; SHAFF, S.E.; WILLIAMS, C.L.; STRAND, E.K.; REEVES, M.; PYKE, D.A.; SCHUPP, E.W.; CHAMBERS, J.C.; 2022. Fuel reduction treatments reduce modeled fire intensity in the sagebrush steppe. *Ecosphere.* 13: e05011.
- FERNÁNDEZ-GARCÍA, V.; MARCOS, E.; FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M.; FERNÁNDEZ-MANSO, A.; QUINTANO, C.; SUÁREZ-SEOANE, S.; CALVO, L.; 2021. Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) applied to the study of habitat



diversity in the fine-grained landscapes of the Cantabrian Mountains. *Remote Sens.* 13: 979.

FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M.; FERNANDES, P.M.; 2024. Enhanced post-wildfire vegetation recovery in prescribed-burnt Mediterranean shrubland: A regional assessment. *For. Ecol. Manag.* 561: 121921.

FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M.; VERRELST, J.; CALVO, L.; SUÁREZ-SEOANE, S.; 2021. Hybrid inversion of radiative transfer models based on high spatial resolution satellite reflectance data improves fractional vegetation cover retrieval in heterogeneous ecological systems after fire. *Remote Sens. Environ.* 255: 112304.

GALE, M.G.; CARY, G.J.; VAN DIJK, I.J.M.; YEBRA, M.; 2021. Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour. *Remote Sens. Environ.* 255: 112282.

GARCÍA, M.; RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; DANSON, F.M.; 2011. Multispectral and LiDAR data fusion for fuel type mapping using Support Vector Machine and decision rules. *Remote Sens. Environ.* 115: 1369–1379.

GARCÍA-CIMARRAS, A.; MANZANERA, J.A.; VALBUENA, R.; 2021. Analysis of Mediterranean vegetation fuel type changes using multitemporal LiDAR. *Forests* 12: 335.

HOFFRÉN, R.; LAMELAS, M.T.; DE LA RIVA, J.; DOMINGO, D.; MONTEALEGRE, A.L.; GARCÍA-MARTÍN, A.; REVILLA, S.; 2023. Assessing GEDI-NASA system for forest fuels classification using machine learning techniques. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 116: 103175.

HUESCA, M.; RIAÑO, D.; USTIN, S.L.; 2019. Spectral mapping methods applied to LiDAR data: Application to fuel type mapping. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 74: 159–168.

KAMOSKE, A.G.; DAHLIN, K.M.; STARK, S.C.; SERBIN, S.P.; 2019. Leaf area density from airborne LiDAR: Comparing sensors and resolutions in a temperate broadleaf forest ecosystem. *For. Ecol. Manag.* 433: 364–375.

LASAPONARA, R.; LANORTE, A.; 2007. Remotely sensed characterization of forest fuel types by using satellite ASTER data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 9: 225–234.

PROBST, P.; BOULESTEIX, A.L.; 2018. To tune or not to tune the number of trees in Random Forest. *J. Mach. Learn. Res.* 18: 1–18.

QUINTANO, C.; FERNÁNDEZ-MANSO, A.; ROBERTS, D.A.; 2013. Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) to map burn severity levels from Landsat images in Mediterranean countries. *Remote Sens. Environ.* 136: 76–88.

RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; PALACIOS-ORUETA, A.; BASTARRICA, A.; 2002. Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Can. J. For. Res.* 32: 1301–1315.

ROBERTS, D.A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R.O.; 1998. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using Multiple Endmember Spectral Mixture models. *Remote Sens. Environ.* 65: 267–279.

VAN EWIJK, K.Y.; TREITZ, P.M.; SCOTT, N.A.; 2011. Characterizing forest succession in central Ontario using LAS-derived indices. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 77: 261–269.



VAN WAGNER, C.E.; 1990. Six decades of forest fire science in Canada. *For. Chron.* 66: 133–137.

VIEDMA, O.; CHICO, F.; FERNÁNDEZ, J.J.; MADRIGAL, C.; SAFFORD, H.D.; MORENO, J.M.; 2020. Disentangling the role of prefire vegetation vs. burning conditions on fire severity in a large forest fire in SE Spain. *Remote Sens. Environ.* 247: 111891.

VIEDMA, O.; SILVA, C.A.; MORENO, J.M.; HUDAK, A.T.; 2024. LadderFuelsR: A new automated tool for vertical fuel continuity analysis and crown base height detection using light detection and ranging. *Methods Ecol. Evol.* 15: 1958–1967.