TELEDETECCIÓN MULTIFUENTE Y MULTIESCALA PARA LA CARACTERIZACIÓN, MODELIZACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL COMBUSTIBLE FORESTAL

Montealegre-Gracia, A. L.
García-Martín, A.
Tanase, M.
Lamelas-Gracia, M. T.
Domingo-Ruíz, D.
Hoffrén-Mansoa, R.
de la Riva-Fernández, J. R.

1. ¿Quiénes somos?

GEOFOREST (Procesos GEOambientales en espacios FORESTales)

- **Grupo de investigación interdisciplinar reconocido** (Orden EMC/563/2026, de 13 de abril) de la Administración de la C.A. de Aragón.
- Integrado en el **Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón** (**IUCA**) de la **Universidad de Zaragoza**.
- **Objetivo:** dar respuesta, con rigor científico y soluciones prácticas, a problemas territoriales y ambientales relacionados con los espacios forestales, contribuyendo a la prevención de riesgos, la conservación de los recursos naturales y la gestión sostenible del territorio.

Geoforest

Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón Universidad Zaragoza

Líneas de investigación

Incendios forestales

- Modelado del riesgo: ocurrencia, propagación, combustibles, etc.
- Evaluación y modelado de la dinámica ambiental post-incendio.
- Análisis de escenarios futuros.

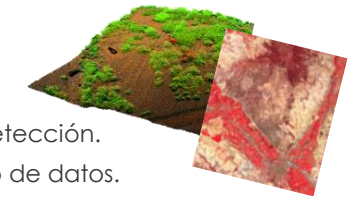
Suelos y quemas prescritas

- Propiedades químicas del suelo y la hojarasca.
- Actividad biológica, propiedades físico-hidrológicas del suelo.
- Quema experimental en laboratorio.
- Caracterización y clasificación de suelos en el ámbito agrícola.

Cartografía y modelado de variables ambientales

- Parámetros de la vegetación: inventario forestal, biomasa, variables biofísicas.
- Cartografía y diagnóstico del paisaje.
- Patrones de distribución de especies.
- Usos del territorio.

Equipamiento y capacidades



- Software específico de SIG y teledetección.
- Servidor para el tratamiento masivo de datos.
- Espectro-radiometría para el registro de variables biofísicas.
- Instrumental para el inventario de variables biofísicas, dasométricas y dendrométricas.
- Receptor GNSS de altas prestaciones.
- Plataformas UAV y sensores:
  - Dron multirrotor Matrice 300 RTK.
  - Dron de ala fija eBee X RTK.
  - Dron multirrotor Mavic 2.
  - Cámara RGB senseFly S.O.D.A.
  - Cámara multiespectral Sequoia.
  - Sensor LiDAR ZENMUSE L1.
  - Sensor térmico Mavic 2 enterprise advanced.

2. Modelos de combustible

Modelos de combustibles forestales

- Describen las **características de la vegetación** (biomasa, humedad, tamaño y su disposición espacial) para estimar y predecir el **comportamiento**, la **velocidad** de propagación y la **intensidad** del fuego mediante simuladores de **incendios**.
- **Modelo Prometheus** adaptado a las condiciones de los **ecosistemas mediterráneos**.

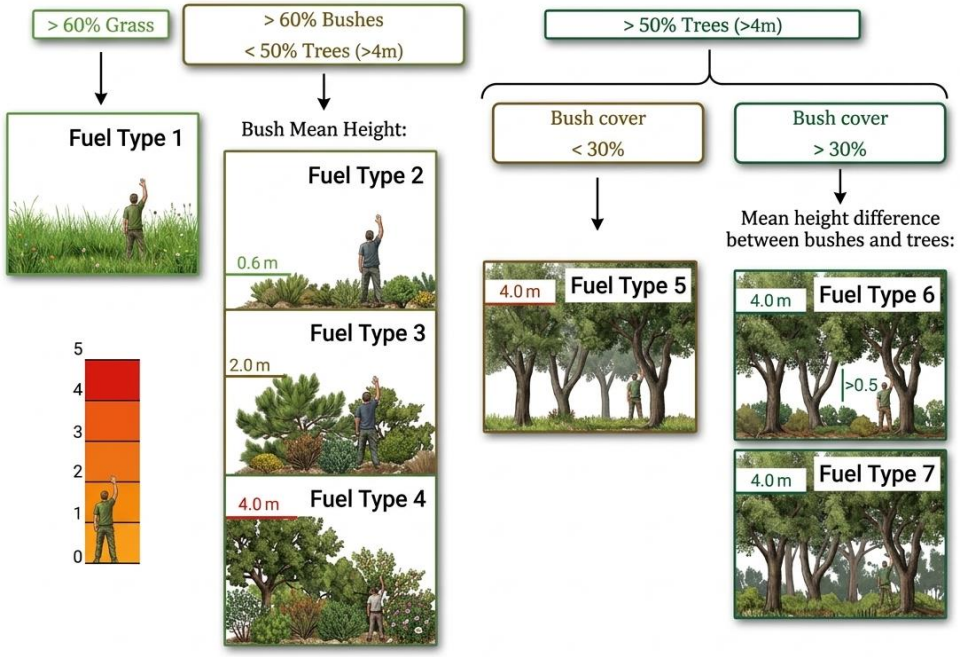


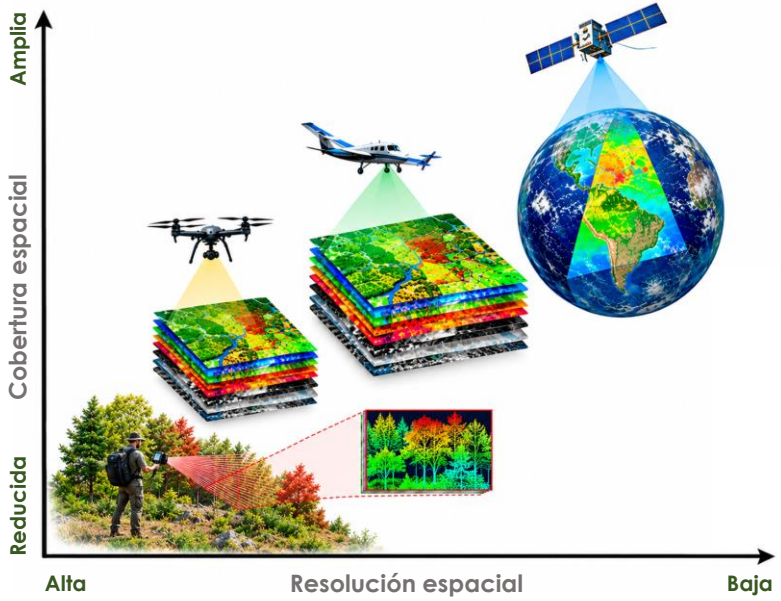
Figure 2. Prometheus fuel classification system for Mediterranean systems.

Fuente: Arroyo *et al.* (2006).

Caracterización y cartografía de combustibles

- El **trabajo de campo** es el método más preciso pero es costoso.
- La **teledetección multisensor y multiescala** permite realizar observaciones objetivas y rentables en zonas extensas e inaccesibles.

- **Sensores pasivos ópticos**: muy utilizados pero incapaces de estimar la altura de la vegetación y de penetrar en el dosel forestal.
- **Sensores activos**: adecuados para caracterizar la estructura forestal.
  - **LiDAR**: numerosos trabajos han demostrado su utilidad pero es limitada la cobertura temporal y espacial,
  - **Radar**: pocos trabajos específicos pero mayor cobertura temporal.

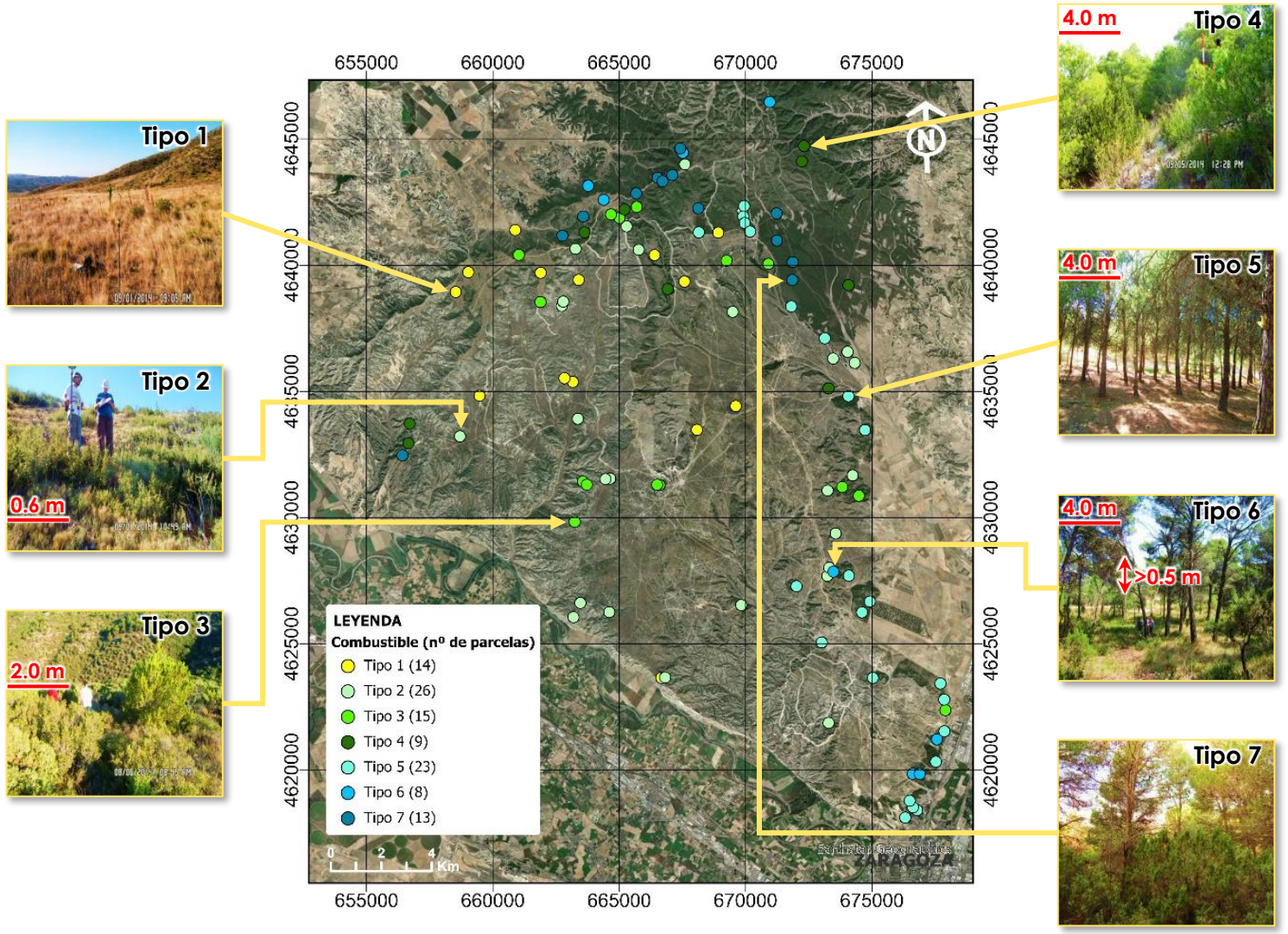


2. Modelos de combustible

Principales proyectos de investigación desarrollados en el grupo GEOFOREST-IUCA

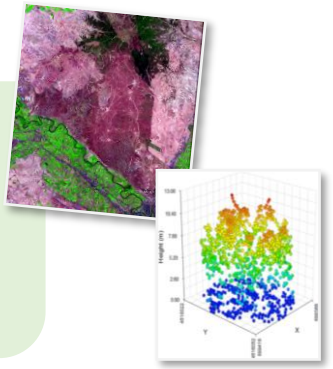
Financiados por el CUD-AGM

- **Cartografía de modelos combustibles mediante fusión de imágenes derivadas de sensores LiDAR, SAR y multiespectrales de alta resolución espacial como apoyo al plan de prevención de incendios forestales en el CENAD "San Gregorio".** 01/09/2013 – 01/03/2015. IP: Lamelas, M.T.
- **Automatización de la cartografía de modelos de combustible forestal mediante modelos de transferencia radiativa 3D (FUELIDAR).** 01/10/2018 – 30/09/2019. IPs: Montorio, R. y Lamelas, M.T.
- **Determinación de la sensibilidad de las imágenes del satélite PAZ para la clasificación de los tipos de combustible en el CENAD "San Gregorio" (FUELPAZ).** 01/01/2020 – 31/12/2020. IP: García-Martín, A.
- **Evaluación del potencial de los datos LiDAR de la misión GEDI-NASA para la clasificación de modelos de combustible forestal (GEDIFUEL).** 01/01/2021 – 31/12/2021. IP: Lamelas, M.T.
- **Clasificación digital de tipos de combustible en el CENAD "San Gregorio" mediante datos multisensor: radar PAZ y Sentinel-1 y óptico Sentinel-2 (MULTICOMB).** 01/01/23 - 31/12/23. IP: García-Martín, A.
- **Evaluación de la transferibilidad de sensor en el modelado de combustibles forestales a partir de nubes de puntos 3D obtenidas mediante teledetección (TRANSENSOR).** 01/01/24 - 31/12/24. IP: Lamelas, M.T.
- **Actualización de la cartografía de combustibles forestales del CENAD "San Gregorio": análisis del aumento en la densidad de puntos de los datos PNOA-LiDAR (2010-2023).** 01/01/26 - 31/12/26. IP: Montealegre, A.L.



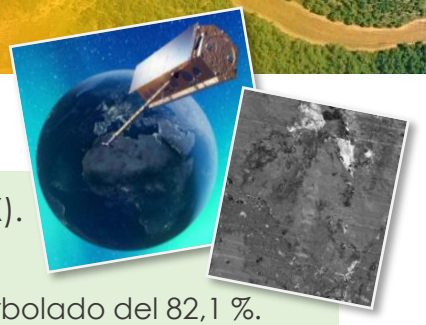
Localización del CENAD y distribución espacial de las parcelas de muestreo según el tipo de combustible (Montealegre, 2026).

2. Modelos de combustible



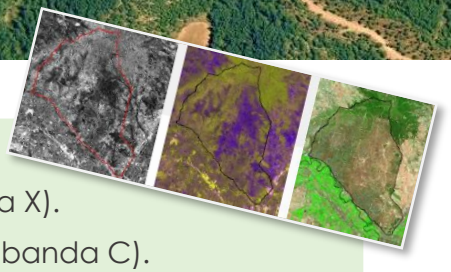
Plataformas:
- SPOT-5 (óptico multiespectral).
- PNOA-LiDAR (1ª cobertura).

Exactitud global: 72,7 %.
Resolución espacial: 10 m.



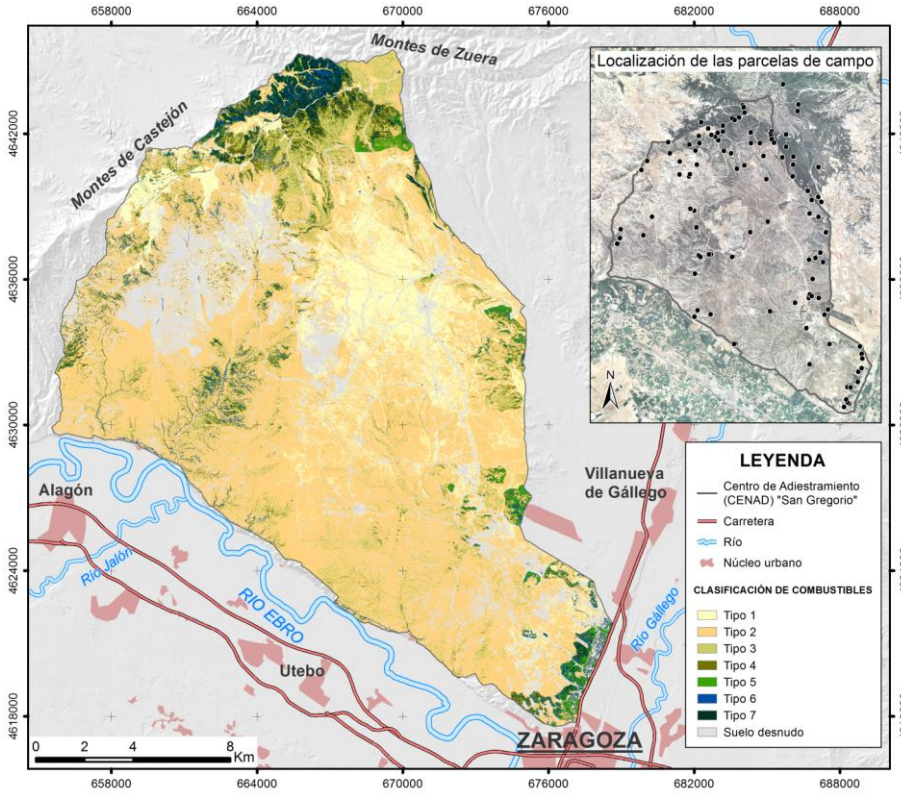
Plataforma: PAZ (banda X).
Exactitud global:
- Pastizales, matorrales y arbolado del 82,1 %.
- 7 tipos de combustible Prometheus del 42,9 %.

Resolución espacial: 25 m.

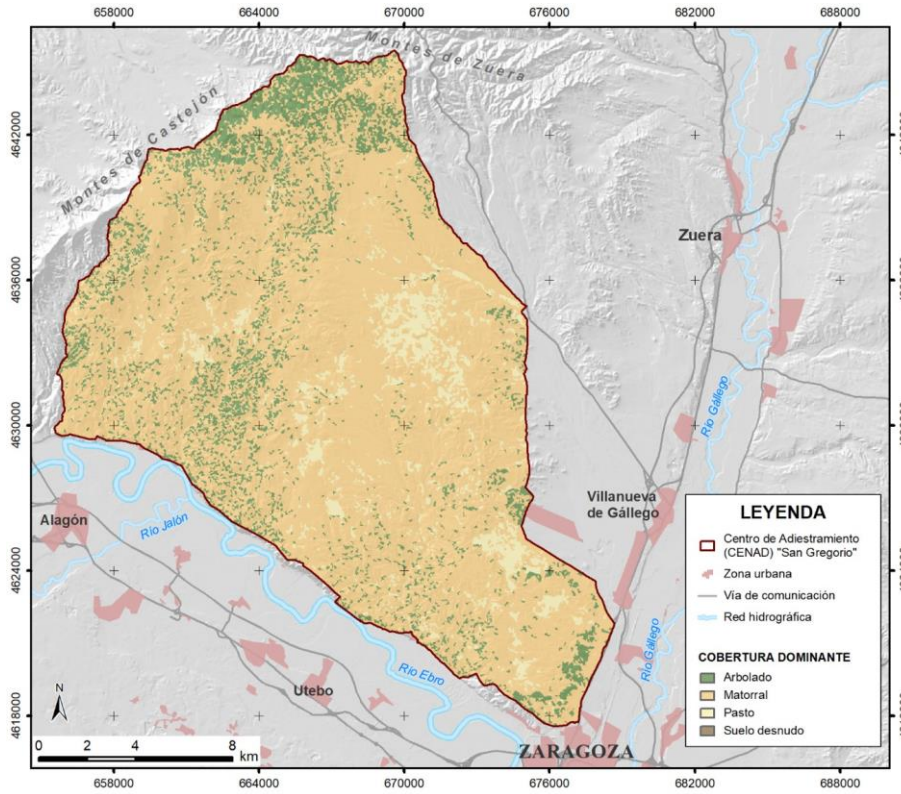


Plataformas:
- PAZ (banda X).
- Sentinel-1 (banda C).
- Sentinel-2 (óptico multiespectral).

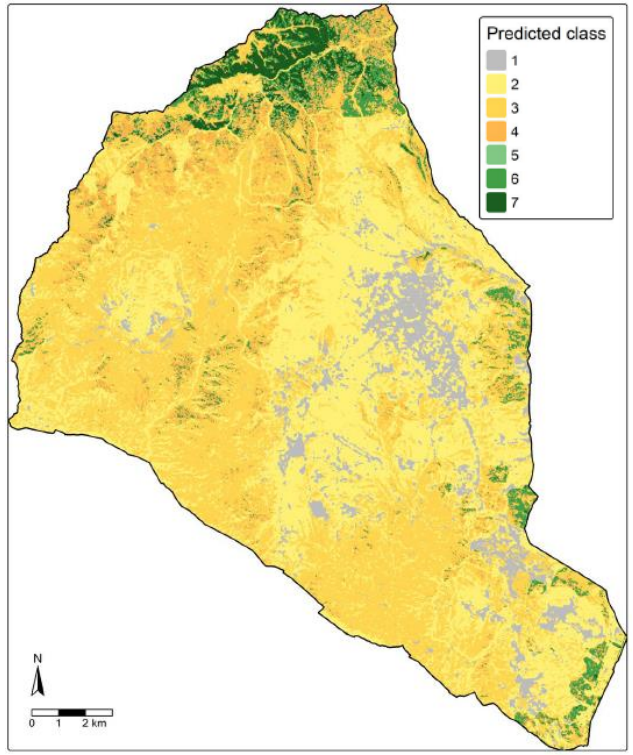
Exactitud global: 74,0 %.
Resolución espacial: 25 m.



Fuente: Montealegre *et al.* (2015).



Fuente: García-Martín *et al.* (2025).



Fuente: García-Martín *et al.* (en preparación).

2. Modelos de combustible

Plataformas:

- UAV-LiDAR (452 puntos/m²).
- HMLS (63.148 puntos/m²).

Exactitud global:

- 81,3 % con datos UAV-LiDAR.
- 95,1 % con datos UAV-LiDAR + HMLS.

Resolución espacial: 20 m.

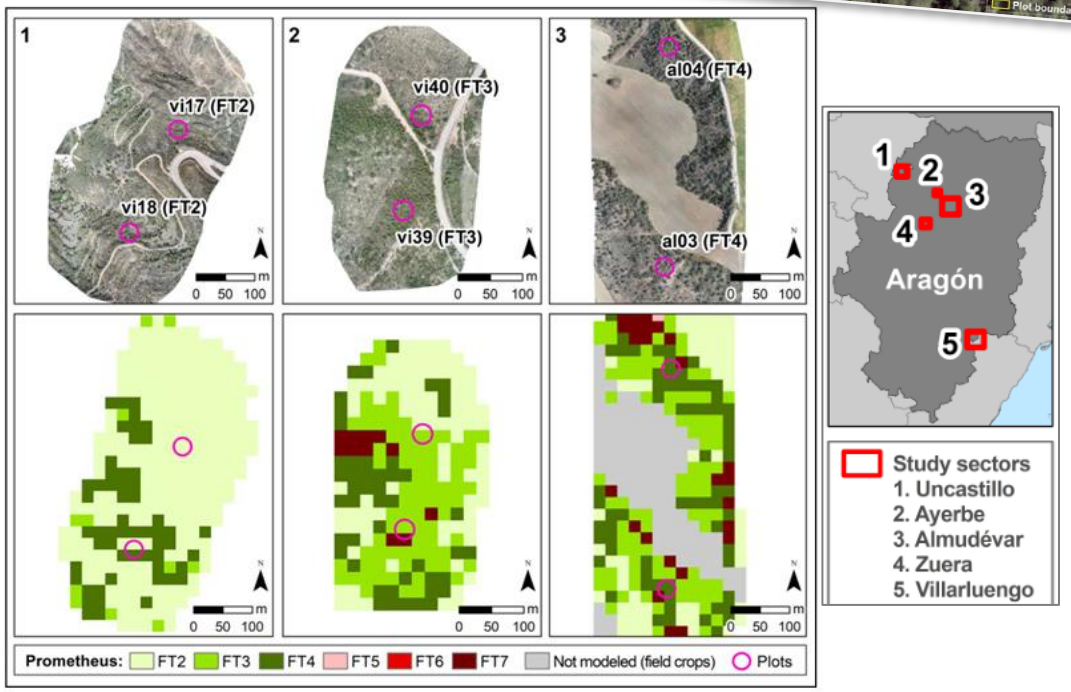


Figure 4. Mapping of Prometheus fuel types from the best classification model (RF) of the UAV data at 20 m spatial resolution. Results in areas with shrub types forest plots: (**1**) Plots "vi17" and "vi18": FT2; (**2**) Plots "vi39" and "vi40": FT3; (**3**) Plots "al03" and "al04": FT4.

Fuente: Hoffrén *et al.* (2024).

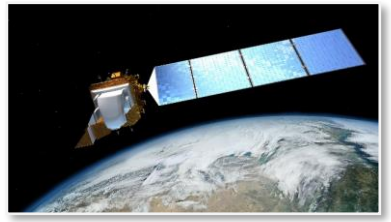
Plataformas:

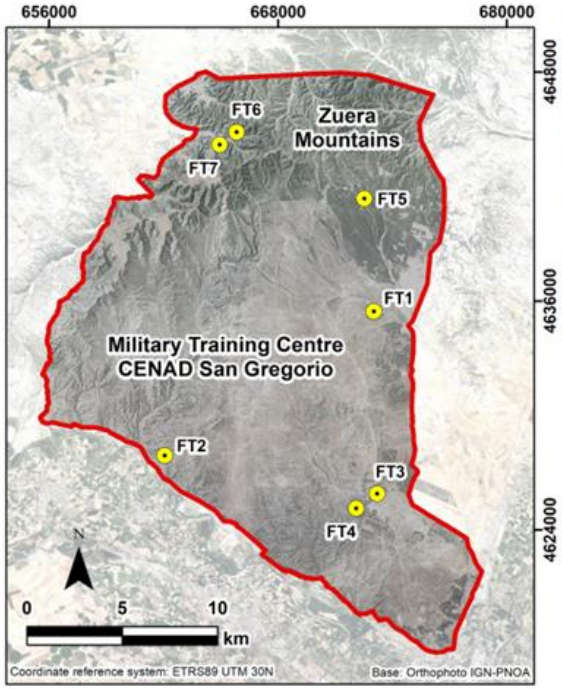
- GEDI (LiDAR satelital).
- Landsat-8 OLI (óptico multiespectral).

Exactitud global:

- 61,5 % con datos GEDI.
- 83,7 % con datos GEDI + Landsat-8 OLI.

GEDI ECOSYSTEM LIDAR





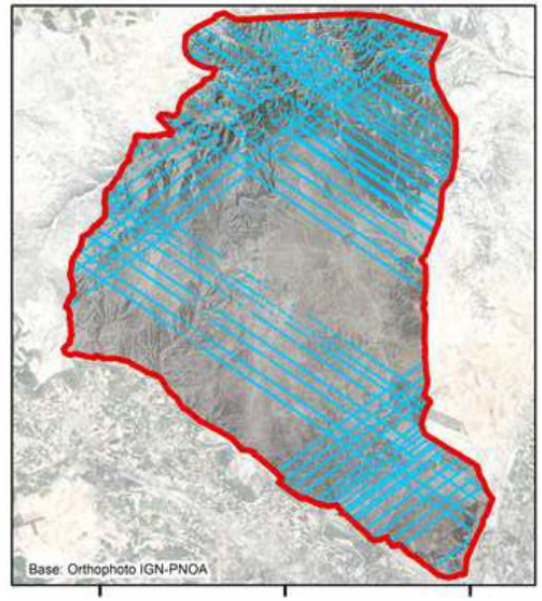


Fig. 2. Study area on the central sector of the Ebro Valley, in Aragon (NE Spain), and examples of each *Prometheus* fuel type within a selection of GEDI footprints.

Fuente: Hoffrén *et al.* (2023).

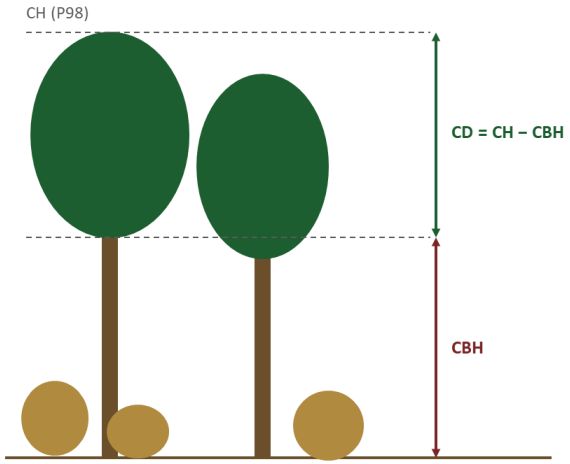
3. Parámetros de combustible

Parámetros de combustible para simuladores de incendio

- Modelos como FARSITE y FlamMap requieren caracterizar la estructura 3D del combustible a escala fina (<50m) para estimar con precisión el inicio y la propagación de los incendios:
- **Variables fundamentales para evaluar el riesgo y comportamiento de los incendios de copa:**
  - Altura de la base de la copa (**CBH** - Canopy Base Height) [m]
  - Densidad aparente del dosel (**CBD** - Canopy Bulk Density) [kg/m³]
  - Carga de combustible del dosel (**CFL** - Canopy Fuel Load) [kg/m²]
- **Variables esenciales para caracterizar los incendios de superficie y la masa vegetal que sirve de escalera hacia el dosel:**
  - Biomasa del matorral (**AGBs** - Shrub Aboveground Biomass) [Mg/ha]
  - Altura del matorral (**Hs** - Shrub Height) [m]
  - Cobertura fraccionaria del matorral (**FCCs** - Shrub Fractional Canopy Cover) [%]

Cartografías de combustibles forestales disponibles actualmente a nivel europeo

- **Aragoneses et al. (2023, 2024, 2025):**
  - Propiedades del dosel arbóreo : CBH, CFL,CBD, CH y FCC,
  - Tamaño de píxel: **1 km**
- **Kutchartt et al. (2025):**
  - Propiedades del dosel arbóreo : CBH y CBD
  - Tamaño de píxel: **100 m**



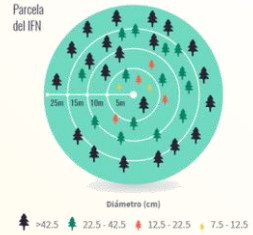
Canopy: BT · BR2 · BL → CFL, CBD

Shrub layer (ladder fuel): AGBs · Hs · FCCs

Objetivo 3F

- **Obtener mapas de combustible multiestrato a escala nacional a 40 m de pixel:**

Metodología



Tres campañas nacionales de adquisición de datos ALS

PNOA 1 2008–2016	PNOA 2 2015–2021	PNOA 3 2022–2025
0.5 pts m⁻²	1–2 pts m⁻²	5 pts m⁻²

Datos de campo: IFN-4

- Parcelas permanentes en intersecciones de malla de 1 × 1 km, 25 m radius
- AGB arbórea: Montero et al. 2005
- AGB del matorral a partir de la altura y la cobertura: Montero et al. 2020

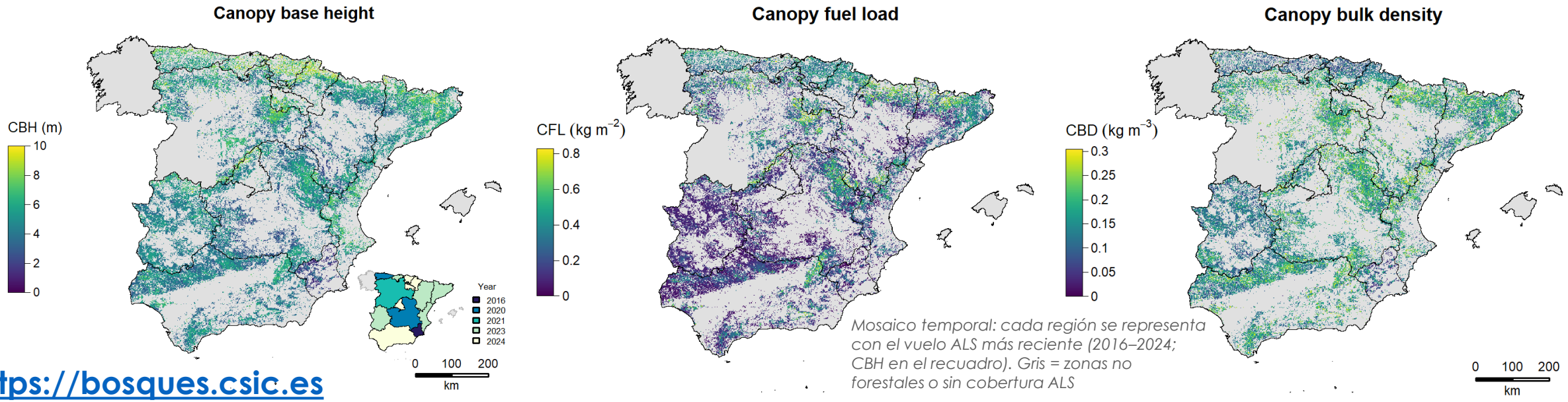
Armonización temporal

- IFN3 → IFN4: las tasas de crecimiento de las parcelas permiten trasladar los valores de campo al año de adquisición de los datos ALS
- CBH: Modelo RF a nivel de árbol, basado en una proyección del DBH y la altura.

14 regiones modelizadas de forma independiente · Métricas ALS a 10 m y modelos a **40 m** (≈ superficie de referencia de las parcelas del IFN)

3. Parámetros de combustible

Productos: mapas nacionales de combustibles de copa con una resolución de 40 m (Patch-CNN)



Mosaico temporal: cada región se representa con el vuelo ALS más reciente (2016–2024; CBH en el recuadro). Gris = zonas no forestales o sin cobertura ALS

https://bosques.csic.es

Comparativa de referencia: productos nacionales (40 m) frente a capas europeas de combustibles forestales.

Las capas europeas solo captan patrones generales → a la escala de los modelos de comportamiento del fuego, presentan sesgos y no reflejan gran parte de la variabilidad. Los mapas de 40 m permiten cubrir esa carencia.

≈ 21%

La cobertura de copas está subestimada por ambos productos europeos.

4.4 m

Los productos europeos de CBH difieren respecto al IFN: Aragoneses subestima la altura en 3,8 m y Kutchartt la sobreestima en 0,6 m.

R^2 0.07 / 0.02

CFL / CBD europeos (1 km) frente a parcelas del IFN

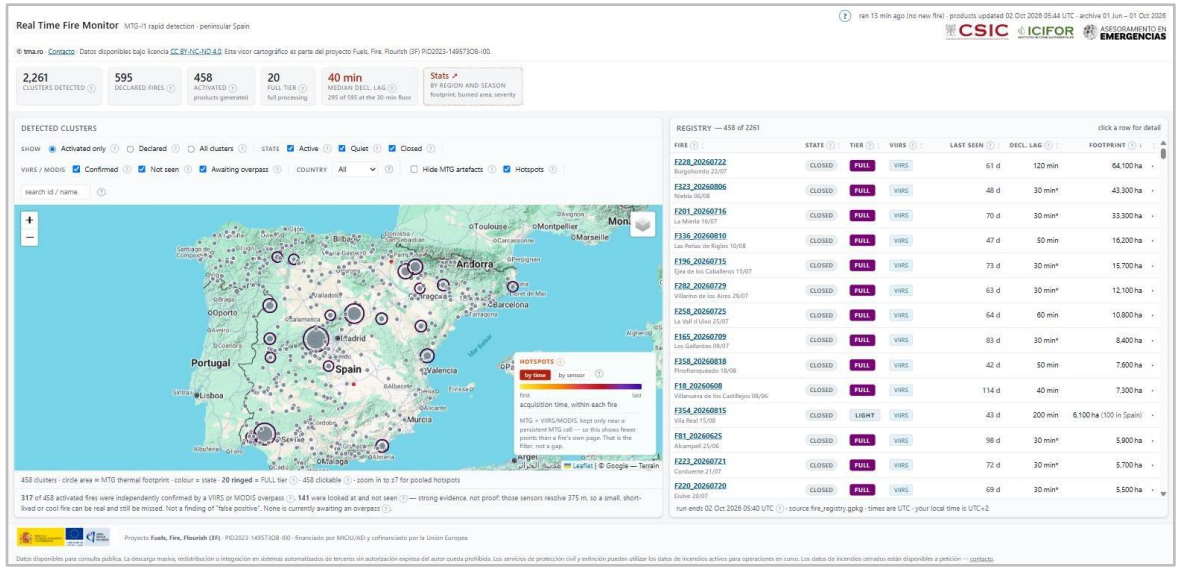
12 – 29%

Se pierde la variabilidad dentro del píxel al pasar de 40 m a 1 km.

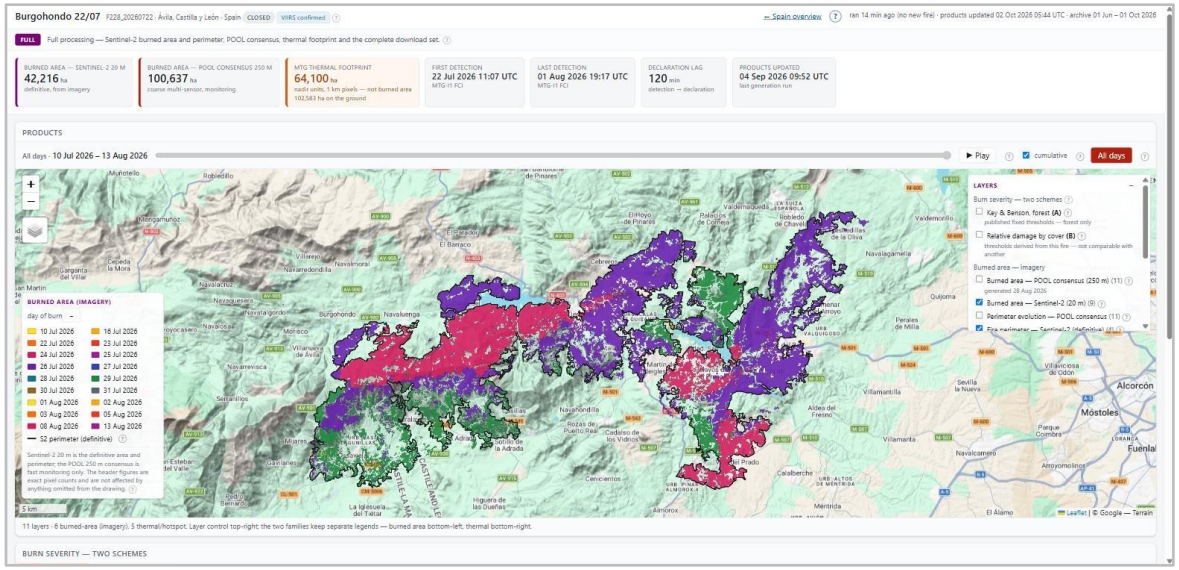
4. Monitorización en tiempo real

También desde 3F: https://fires.tma.ro ----> https://fires.csic.es

Detección mediante MTG-I1 FCI (1 km, cada 10 minutos) → área quemada mediante Sentinel-3 / VIIRS → perímetro y severidad del incendio mediante Sentinel-2 · España peninsular, temporada del 1 de junio al 1 de octubre de 2026



Vista general de la península: agrupaciones detectadas y registro de incendios.



Ficha individual de cada incendio: área quemada por día del incendio mediante Sentinel-2, perímetro y severidad.

2.261	595	458	40 min	317 / 458
Clusteres detectados	Incendios declarados	Incendios con productos cartográficos disponibles	Retraso medio respecto a la declaración oficial	Confirmados por VIIRS / MODIS

4. Referencias

- Domingo, D.; de la Riva, J.; Lamelas, T.; García-Martín, A.; Ibarra , P.; Echeverría, M.T.; Hoffrén, R. **Fuel type classification using Airborne Laser Scanning and Sentinel 2 data in Mediterranean forest affected by wildfires**. *REMOTE SENSING*. 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12213660
- Hoffrén, R.; Lamelas, M.T.; de la Riva, J. **UAV-derived photogrammetric point clouds and multispectral indices for fuel estimation in Mediterranean forests**. *REMOTE SENSING APPLICATIONS: SOCIETY AND ENVIRONMENT*. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100997
- Hoffrén, R.; Lamelas, M.T.; de la Riva, J.; Domingo, D.; Montealegre, A.L.; García-Martín, A.; Revilla, S. **Assessing GEDI-NASA system for forest fuels classification using machine learning techniques**. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION*. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103175
- Hoffrén, R.; Lamelas, M.T.; de la Riva, J. **Classification and mapping of fuels in Mediterranean forest landscapes using a UAV-LiDAR system and integration possibilities with Handheld Mobile Laser Scanner systems**. *REMOTE SENSING*. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/rs16183536
- Hoffrén, R.; Lamelas, M.T.; de la Riva, J. **Evaluation of handheld mobile laser scanner systems for the definition of fuel types in structurally complex Mediterranean forest stands**. *FIRE*. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/fire7020059
- García-Martín, A.; Domingo, D.; Lamelas, M.T.; de la Riva, J.; Escribano, F.; Montealegre, A.L.; Montorio, R.; Pérez-Cabello, F. **Fuel type mapping with X-band SAR in military training areas for wildfire risk assessment**. *JOURNAL OF APPLIED REMOTE SENSING*. 2025. DOI: https://doi.org/10.1117/1.JRS.19.044514
- Tanase, M.; García-Martín, A.; Lamelas, M.T. **Mapping multi-strata forest fuel attributes across peninsular Spain using airborne LiDAR data**. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* (En revisión)

Teledetección multifuente y multiescala para la caracterización, modelización y cartografía del combustible forestal

Gracias!

Montealegre-Gracia, A. L.
García-Martín, A.
Tanase, M.
Lamelas-Gracia, M. T.
Domingo-Ruíz, D.
Hoffrén-Mansoa, R.
de la Riva-Fernández, J. R.

Agradecimientos:

- PID2023-149573OB-I00 - Fuels, Fire, Flourish (3F).
- Proyecto CUD-2026_14.