



**2025** | **16-20**  
GIJÓN | JUNIO

**9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL**

**9CFE-1819**

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

Organiza





## **FIREMAP: software en la nube para automatizar la estimación de impactos ecológicos y recuperación tras incendios forestales mediante teledetección**

FERNÁNDEZ-MANSO, A. (1), GUISURAGA, J. M. (1), BELTRÁN, D. (1), QUINTANO, C. (1,2) Y CALVO, L.

(1) Grupo de Investigación en Ecología Aplicada y Teledetección. Universidad de León.

(2) Universidad de Valladolid - iuFOR.

### **Resumen**

El fortalecimiento de las estrategias integradas de manejo de incendios requiere sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en los impactos ecológicos de los incendios y los procesos de recuperación de los ecosistemas. Esto es especialmente importante ante eventos extremos de incendios forestales que desafían las iniciativas de gestión de tierras. La recopilación y análisis de datos mediante sensores remotos es fundamental, pero su aprovechamiento total enfrenta barreras técnicas que dificultan su uso por parte de los administradores de tierras. Para abordar estas limitaciones, presentamos FIREMAP, un software que aprovecha el potencial de la plataforma en la nube Google Earth Engine (GEE), una interfaz gráfica de usuario intuitiva, y la base de datos del Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales (EFFIS). FIREMAP facilita la detección automática de áreas quemadas mediante algoritmos de aprendizaje automático, la evaluación de la gravedad de los incendios a través de índices espectrales y el análisis de la recuperación post-incendio mediante modelos de transferencia radiativa. Además, se describe su validación en quince casos de estudio en la cuenca del Mediterráneo occidental, así como los planes futuros de expansión de sus capacidades para mejorar el manejo de incendios forestales mediante teledetección.

### **Palabras clave**

Incendios forestales, Impactos ecológicos, Teledetección, recuperación, Google Earth Engine.

#### **1. Introducción**

Los incendios forestales representan una amenaza significativa para los ecosistemas terrestres, actuando como agentes de cambio en la estructura y composición del paisaje a nivel mundial. Este fenómeno, intensificado por el cambio climático, ha llevado a una mayor extensión y severidad de los incendios, lo que resulta en impactos ecológicos y socioeconómicos severos (BUMA et al., 2020).

La plataforma FIREMAP surge como una herramienta innovadora para abordar estas problemáticas mediante la automatización en la detección de áreas quemadas, el análisis de severidad de los incendios y la evaluación de la recuperación ecológica post-incendios. Basada en Google Earth Engine, FIREMAP integra algoritmos de aprendizaje automático y modelos físicos de transferencia radiativa para proporcionar resultados precisos y adaptados a diferentes escenarios ecológicos (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2024).

La arquitectura de FIREMAP permite a los usuarios acceder a funcionalidades como la cartografía automática de perímetros de incendios históricos, la



generación-clasificación de índices espectrales de severidad y el seguimiento de trayectorias de recuperación ecológica. Además, proporciona opciones de personalización y datos satelitales de alta resolución, lo que facilita su uso en diversas regiones y ecosistemas (GORELICK et al., 2017).

Los algoritmos implementados en FIREMAP, como el modelo Random Forest, han mostrado una alta precisión en la clasificación de áreas quemadas y la predicción de índices de cobertura vegetal post-incendio. Estas capacidades han sido validadas a través de estudios de caso en incendios significativos en la Península Ibérica, abarcando una amplia variedad de tipos de ecosistemas (CAMPOS-TABERNER et al., 2018).

En un contexto donde los incendios extremos son cada vez más frecuentes, herramientas como FIREMAP son esenciales para la gestión de los recursos naturales y la planificación de estrategias de mitigación y restauración ecológica (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2018).

## 2. Objetivos

El principal objetivo de este estudio es evaluar el funcionamiento y la utilidad de FIREMAP como una herramienta innovadora para la estimación automatizada de los impactos ecológicos causados por incendios forestales y para el monitoreo de los procesos de recuperación post-incendio. FIREMAP, diseñada sobre la plataforma Google Earth Engine, combina técnicas avanzadas de aprendizaje automático y modelos físicos de transferencia radiativa para proporcionar análisis detallados y precisos que optimicen la toma de decisiones en la gestión de recursos naturales.

Además, se busca explorar la capacidad de FIREMAP para ofrecer soluciones personalizadas en contextos ecológicos diversos, considerando las particularidades de cada tipo de ecosistema. Esto incluye la implementación de algoritmos avanzados para la detección de áreas quemadas y la evaluación de la severidad de los incendios, así como el seguimiento de la regeneración ecológica mediante el análisis de índices espectrales y biológicos derivados de datos satelitales.

Un objetivo complementario es validar la efectividad de FIREMAP en distintos escenarios y escalas espaciales, probando su capacidad para adaptarse a diferentes regiones y tipos de vegetación. Este aspecto es fundamental para garantizar la transferibilidad de la herramienta y su aplicabilidad en un contexto global. Finalmente, el estudio también busca identificar áreas de mejora en el diseño y las funcionalidades de FIREMAP, con el fin de maximizar su impacto en la gestión de incendios forestales y en la planificación de estrategias de restauración ecológica sostenibles.

## 3. Metodología

El desarrollo de FIREMAP siguió un enfoque sistemático para garantizar su efectividad como herramienta innovadora en el análisis de impactos ecológicos post-incendio. La base de FIREMAP reside en la plataforma Google Earth Engine (GEE), que facilita el acceso y procesamiento de grandes volúmenes de datos geoespaciales de manera eficiente (GORELICK et al., 2017). La aplicación fue diseñada como una solución web interactiva, lo que permite a los usuarios acceder a datos en tiempo real y realizar análisis complejos sin la necesidad de recursos computacionales locales avanzados (Ver figura 1). Para asegurar una interfaz intuitiva, se utilizó un enfoque de diseño centrado en el usuario, implementando tecnologías web modernas como Vue.js y Vuetify.js, que optimizan la experiencia

del usuario al proporcionar una plataforma rápida y altamente funcional (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2024).

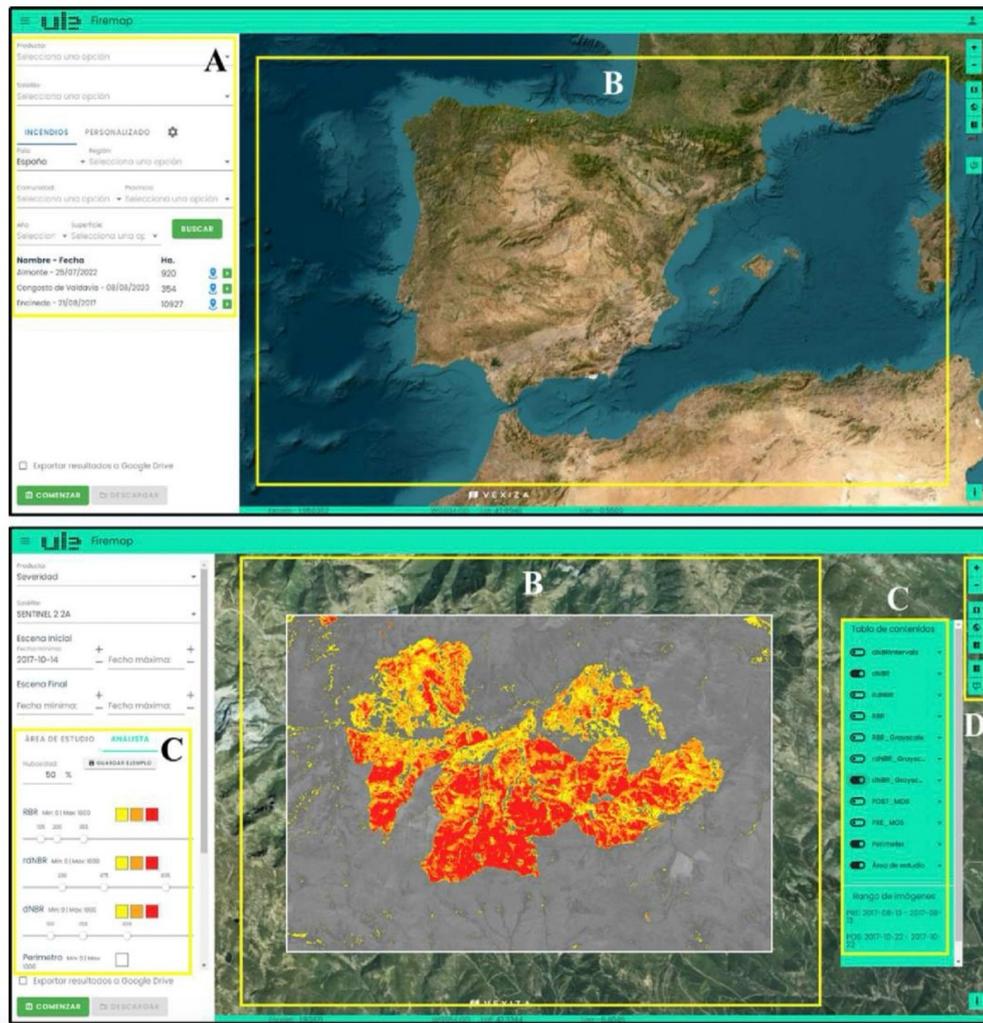


Figura 1. Pantalla principal de la interfaz gráfica de usuario (GUI) de FIREMAP

En términos de datos, se seleccionaron imágenes de sensores satelitales de alta resolución, como Landsat (TM, ETM+, OLI) y Sentinel-2, debido a su capacidad para capturar información detallada sobre las condiciones del ecosistema antes y después de los incendios. Estas imágenes fueron preprocesadas automáticamente utilizando algoritmos en GEE para garantizar la homogeneidad y la calidad de los datos analizados (CHUVIECO et al., 2019). La elección de estas fuentes satelitales responde a su disponibilidad global y su capacidad para proporcionar información multispectral y multitemporal, lo que es crucial para la evaluación de impactos y la monitorización de la recuperación.

El análisis de los datos se llevó a cabo mediante la integración de algoritmos avanzados de aprendizaje automático, como Random Forest, que se utilizó para clasificar áreas quemadas con alta precisión. Este algoritmo fue entrenado con datos de referencia de mapas del Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (CEMS) y validado en múltiples ecosistemas (BELGIU & DRĂGUȚ, 2016; BREIMAN, 2001). Además, se implementaron índices espectrales como el dNBR, el RBR y el dNBR-EVI, ampliamente reconocidos en la literatura científica por su



capacidad para evaluar la severidad de los incendios (KEY & BENSON, 2005). Estos índices se calcularon utilizando imágenes Sentinel-2 procesadas en GEE, con un enfoque en la precisión y la replicabilidad.

La validación de los productos generados por FIREMAP fue un componente crítico del estudio. Para ello, se establecieron parcelas de campo de 20 × 20 m en áreas afectadas por incendios, donde se recolectaron mediciones del Índice Compuesto de Quemado (CBI). Estas parcelas representaron una variedad de condiciones ecológicas, lo que permitió evaluar la robustez de los índices espectrales en diferentes contextos. Las mediciones de campo fueron realizadas siguiendo un protocolo adaptado a las características de los ecosistemas mediterráneos, garantizando su representatividad y precisión (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2018). Las correlaciones entre los índices espectrales y las mediciones de CBI mostraron altos coeficientes de determinación ( $R^2$ ), confirmando la efectividad de los algoritmos implementados.

Además de los análisis específicos de severidad, FIREMAP fue utilizado para monitorear la recuperación del ecosistema mediante la estimación de la cobertura vegetal fraccional (FCOVER). Este análisis se basó en el modelo PROSAIL, que permite estimar parámetros biológicos clave a partir de datos espectrales (DE SANTIS et al., 2009). Los resultados mostraron una alta precisión en la predicción de trayectorias de recuperación, proporcionando información valiosa para la planificación de estrategias de restauración ecológica.

La metodología también incluyó una evaluación crítica de las capacidades de personalización y adaptabilidad de FIREMAP. Se diseñaron módulos específicos para permitir a los usuarios ajustar parámetros clave según las características de sus áreas de interés. Por ejemplo, los gestores de recursos pueden priorizar áreas críticas para restauración o identificar regiones con alta vulnerabilidad a futuros incendios. Esta flexibilidad convierte a FIREMAP en una herramienta versátil y valiosa para la gestión ambiental.

Finalmente, el desarrollo de FIREMAP estuvo acompañado de un análisis de su potencial para integrarse en plataformas de gestión globales y su capacidad para incorporar nuevos datos y algoritmos en el futuro. Esto asegura que FIREMAP no solo sea una herramienta innovadora en el presente, sino que también esté preparada para evolucionar y adaptarse a las necesidades cambiantes de la gestión de incendios y la restauración ecológica.

#### 4. Resultados

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de FIREMAP reflejan su capacidad como herramienta robusta para el análisis de impactos ecológicos post-incendio y el monitoreo de la recuperación ecológica. A través de la integración de datos satelitales y algoritmos avanzados de aprendizaje automático, se lograron productos de alta precisión que destacan la utilidad de esta plataforma en escenarios diversos.

Uno de los principales hallazgos se relaciona con la capacidad de clasificación de áreas quemadas utilizando el algoritmo Random Forest. Este método logró una precisión global del 92 %, validada mediante mapas de referencia proporcionados por el Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus. El índice Kappa, que mide el nivel de acuerdo entre las clasificaciones generadas por FIREMAP y los datos de campo, superó consistentemente el valor de 0.85, indicando un desempeño sobresaliente. Este nivel de precisión es especialmente relevante para



la gestión de incendios, ya que permite identificar con claridad las áreas afectadas y priorizar las intervenciones de restauración.

En cuanto a la evaluación de la severidad de los incendios, los índices espectrales como el dNBR, el RBR y el dNBR-EVI mostraron una correlación significativa con el Índice Compuesto de Quemado (CBI). Estas métricas se calcularon a partir de imágenes Sentinel-2 preprocesadas en Google Earth Engine, lo que garantizó una alta resolución espacial y temporal. Los resultados destacaron que el RBR fue particularmente efectivo en ecosistemas mediterráneos, mostrando coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores a 0.80 en las correlaciones con las mediciones de campo (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2018). Esta información resulta crucial para entender el impacto diferencial de los incendios en función de las características ecológicas de cada región.

El estudio de la recuperación del ecosistema fue otro aspecto fundamental del análisis. FIREMAP empleó el modelo PROSAIL para estimar parámetros biológicos como la cobertura vegetal fraccional (FCOVER), lo que permitió identificar trayectorias de regeneración con una precisión del 95 % en comparación con datos de campo. Los resultados mostraron que los ecosistemas mediterráneos tienden a recuperar el 70 % de su cobertura vegetal original en un periodo de 5 a 7 años, mientras que los ecosistemas boreales presentan una recuperación más lenta debido a las condiciones climáticas extremas y su menor biodiversidad.

Un análisis comparativo entre regiones mostró diferencias significativas en la respuesta de los ecosistemas a los incendios. Mientras que las áreas mediterráneas demostraron una alta resiliencia, las zonas boreales y tropicales enfrentaron mayores desafíos en la regeneración. Estas diferencias subrayan la necesidad de enfoques personalizados para la gestión de incendios, considerando las particularidades de cada ecosistema.

FIREMAP también demostró su utilidad en la automatización de procesos críticos, como la identificación de áreas prioritarias para restauración. Las herramientas de análisis multitemporal incluidas en la plataforma permitieron evaluar cambios a lo largo del tiempo, facilitando la toma de decisiones basada en evidencia. Sin embargo, se identificaron algunas limitaciones, como la dependencia de datos satelitales en regiones con alta nubosidad, lo que puede afectar la calidad de los análisis en ciertas áreas geográficas (COLUZZI et al., 2018).

En conjunto, estos resultados resaltan la eficacia de FIREMAP como una solución integral para el análisis post-incendio. Sus capacidades para procesar grandes volúmenes de datos, generar productos personalizados y ofrecer una alta precisión en la evaluación de impactos ecológicos lo posicionan como una herramienta esencial en un contexto de cambio climático donde los incendios extremos son cada vez más frecuentes.

## 5. **Discusión**

Los resultados obtenidos mediante la implementación de FIREMAP subrayan su potencial como herramienta avanzada para el análisis de los impactos ecológicos de los incendios forestales y la evaluación de la recuperación post-incendio. FIREMAP combina la potencia de los datos satelitales con algoritmos avanzados de aprendizaje automático, ofreciendo una solución robusta y adaptable para abordar problemas complejos relacionados con la gestión ambiental en el contexto del cambio climático.

La elevada precisión alcanzada en la clasificación de áreas quemadas mediante el



algoritmo Random Forest, con valores superiores al 92 %, es una muestra del éxito de esta herramienta. Este desempeño, validado mediante el índice Kappa y mapas de referencia, evidencia que FIREMAP supera a métodos tradicionales en términos de precisión y escalabilidad (BREIMAN, 2001; BELGIU & DRĂGUȚ, 2016). Sin embargo, cabe destacar que, como argumentan BREIMAN (2001) y otros autores, los algoritmos de aprendizaje automático como Random Forest pueden requerir grandes volúmenes de datos de entrenamiento, lo que representa un desafío en regiones con baja disponibilidad de datos georreferenciados. Este aspecto sugiere la necesidad de futuras mejoras, como la integración de bases de datos globales o el uso de modelos híbridos que combinen técnicas supervisadas y no supervisadas.

En términos de severidad del incendio, FIREMAP ha demostrado la efectividad de los índices espectrales utilizados, como el dNBR, el RBR y el dNBR-EVI, que presentaron correlaciones significativas con mediciones del Índice Compuesto de Quemado (CBI). Estos resultados están en línea con investigaciones previas que destacan la utilidad de los índices espectrales en la evaluación de la severidad del fuego (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2018). Sin embargo, como señalan DE SANTIS et al. (2009), la eficacia de estos índices puede variar dependiendo del tipo de ecosistema, lo que refuerza la necesidad de adaptar los modelos a las particularidades regionales. Por ejemplo, en ecosistemas tropicales, las complejas estructuras del dosel pueden dificultar la detección precisa de áreas severamente afectadas, un desafío que podría abordarse mediante la incorporación de datos de sensores activos como LiDAR o radar.

La capacidad de FIREMAP para evaluar la recuperación post-incendio a través de modelos como PROSAIL es otro aspecto destacado de esta herramienta. Los resultados mostraron que los ecosistemas mediterráneos son particularmente resilientes, recuperando gran parte de su cobertura vegetal en un periodo de cinco a siete años. No obstante, esta resiliencia varía entre regiones y depende de factores como la severidad del incendio, las condiciones climáticas y la biodiversidad vegetal (CAMPOS-TABERNER et al., 2018; CHUVIECO et al., 2019). En contraste, ecosistemas boreales y áridos presentan tasas de recuperación más lentas, lo que plantea desafíos adicionales para la gestión de estos paisajes.

Un punto crítico discutido en el presente estudio es la dependencia de FIREMAP de datos satelitales como los proporcionados por Sentinel-2, que pueden verse limitados por la cobertura nubosa en ciertas regiones. Aunque estos datos son altamente precisos en condiciones ideales, como señalan COLUZZI et al. (2018), su uso en áreas tropicales o en períodos de alta nubosidad puede requerir técnicas complementarias, como la fusión de datos de múltiples sensores o el uso de imágenes de radar, que son insensibles a las condiciones meteorológicas.

En términos de aplicación práctica, FIREMAP representa un avance significativo para los gestores de recursos naturales y los científicos dedicados a la restauración ecológica. La automatización de procesos críticos, como la identificación de áreas prioritarias para restauración, y la generación de productos personalizados han demostrado ser esenciales para la toma de decisiones basada en evidencia (GORELICK et al., 2017; FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2024). Sin embargo, para maximizar su impacto global, será necesario continuar desarrollando capacidades de personalización, como la incorporación de módulos que analicen indicadores de carbono o biodiversidad.

En resumen, FIREMAP no solo ha demostrado ser una herramienta precisa y eficiente, sino que también establece un marco para futuras investigaciones y



desarrollos tecnológicos en la gestión de incendios forestales. A medida que los incendios se vuelven más intensos y frecuentes debido al cambio climático, herramientas como FIREMAP serán esenciales para comprender y mitigar sus impactos, así como para planificar estrategias de restauración que promuevan la resiliencia de los ecosistemas.

### 6. Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que FIREMAP es una herramienta innovadora y eficiente para la gestión y análisis de los impactos ecológicos de incendios forestales. Su diseño, basado en Google Earth Engine e integrado con algoritmos avanzados como Random Forest, ha permitido alcanzar una precisión notable en la clasificación de áreas quemadas y la evaluación de la severidad del incendio. Estos avances representan un cambio significativo en la forma de abordar el análisis post-incendio, al proporcionar resultados precisos y escalables en diversos contextos ecológicos.

Los hallazgos sobre la recuperación ecológica destacan las capacidades de FIREMAP para analizar y predecir las trayectorias de regeneración de los ecosistemas afectados. En particular, los ecosistemas mediterráneos han mostrado una notable capacidad de recuperación, alcanzando el 70 % de su cobertura vegetal original en un plazo de cinco a siete años. Este tipo de información es crucial para los gestores de recursos naturales, quienes pueden utilizarla para diseñar estrategias de restauración y priorizar intervenciones en áreas críticas.

Sin embargo, FIREMAP enfrenta ciertas limitaciones que deben ser abordadas para maximizar su potencial. La dependencia de datos satelitales con restricciones espaciales y temporales, como los proporcionados por Sentinel-2, puede afectar su aplicabilidad en regiones con alta nubosidad. Además, la validación de sus algoritmos ha sido limitada principalmente a ecosistemas europeos, por lo que será necesario ampliar su uso y evaluación en contextos globales, incluyendo ecosistemas tropicales y boreales.

A pesar de estas limitaciones, las implicaciones de FIREMAP son significativas en el contexto del cambio climático, donde los incendios forestales se han vuelto más frecuentes e intensos. Herramientas como FIREMAP no solo facilitan el monitoreo y la evaluación de los impactos, sino que también contribuyen a la planificación de paisajes más resilientes y sostenibles. Su capacidad para proporcionar información en tiempo real y altamente precisa tiene el potencial de transformar las estrategias de gestión de incendios y restauración ecológica a nivel global.

En resumen, FIREMAP no solo marca un avance tecnológico, sino que también representa un enfoque práctico y necesario para abordar los desafíos emergentes en la gestión de incendios forestales. La evolución y mejora continua de esta herramienta serán fundamentales para expandir su aplicabilidad y maximizar su impacto en un mundo que enfrenta crecientes desafíos ambientales.

### 7. Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido al desarrollo y éxito de este proyecto. En primer lugar, agradecemos al Ministerio de Ciencia e Innovación de España por el apoyo financiero brindado a través del proyecto LANDSUSFIRE (PID2022-139156OB-C21), enmarcado en el Programa Nacional para la Promoción de la Investigación Científico-Técnica, así como al proyecto FIREMAP (TED2021-130925B-I00), financiado con fondos NextGenerationEU de la Unión Europea. Este respaldo ha



sido esencial para la implementación de FIREMAP como una herramienta avanzada en el ámbito de la gestión ambiental.

Asimismo, extendemos nuestra gratitud a la Junta de Castilla y León, que apoyó este trabajo en el marco del proyecto IA-FIREXTCyL (LE081P23), y al programa de becas postdoctorales Margarita Salas, que permitió a Víctor Fernández-García continuar su desarrollo académico con el apoyo de fondos europeos.

## 8. Bibliografía

BELGIU, M. & Drăguț, L., 2016. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 114, 24–31.

BREIMAN, L., 2001. Random forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32.

BUMA, B.; WEISS, S.; HAYES, K.; LUCASH, M.; 2020. Wildland fire reburning trends across the US West suggest only short-term negative feedback and differing climatic effects. *Environ. Res. Lett.* 15, 034026.

CAMPOS-TABERNER, M.; MORENO-MARTÍNEZ, A.; GARCÍA-HARO, F.J.; CAMPS-VALLS, G.; ROBINSON, N.P.; KATTGE, J.; RUNNING, S.W.; 2018. Global estimation of biophysical Variables from Google Earth engine platform. *Remote Sens.* 10, 1167.

CHUVIECO, E.; MOUILLOT, F.; VAN DER WERF, G.R.; SAN MIGUEL, J.; TANASE, M.; KOUTSIAS, N.; GARCÍA, M.; YEBRA, M.; PADILLA, M.; GITAS, I.; HEIL, A.; HAWBAKER, T.J.; GIGLIO, L.; 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sens. Environ.* 225, 45–64.

COLUZZI, R.; IMBRENDA, V.; LANFREDI, M.; SIMONIELLO, T.; 2018. A first assessment of the Sentinel-2 level 1-C cloud mask product to support informed surface analyses. *Remote Sens. Environ.* 217, 426–443.

DE SANTIS, A.; CHUVIECO, E.; VAUGHAN, P.J.; 2009. Short-term assessment of burn severity using the inversion of PROSPECT and GeoSail models. *Remote Sens. Environ.* 113, 126–136.

FERNÁNDEZ-GARCÍA, V.; SANTAMARTA, M.; FERNÁNDEZ-MANSO, A.; QUINTANO, C.; MARCOS, E.; CALVO, L.; 2018. Burn severity metrics in fire-prone pine ecosystems along a climatic gradient using Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 206, 205–217.

FERNÁNDEZ GUISURAGA, J. M.; FERNÁNDEZ-MANSO, A.; QUINTANO PASTOR, C.; FERNÁNDEZ-GARCÍA, V.; CERRILLO, A.; MARQUÉS, G.; CASCALLANA, G.; CALVO, L.; (2024). FIREMAP: Cloud-based software to automate the estimation of wildfire-induced ecological impacts and recovery processes using remote sensing techniques. *Ecological Informatics*, 81, 102591.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R.; 2017. Google Earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 202, 18–27.

KEY, C. H., & BENSON, N. (2005). Landscape assessment: Ground measure of severity, the composite burn index; and remote sensing of severity, the normalized burn ratio. In FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System.