

CUARTA ÉPOCA

GEOGRAPHICALIA

1977 - 1988 - 2000 - 2023

**EDITORIAL:**

De los problemas
territoriales a la gestión
sostenible

ARTÍCULOS:

Crisis de la vivienda en España |
Datos geoespaciales en Ecuador
| Análisis de la valoración
catastral en Ecuador y España |
Percepción del alumnado sobre
riesgos naturales | Simulación
de la población de Navarra 2050
| Planificación energética
territorial

MAPAS:

Preservación de rodales
maduros en la gestión forestal |
Cartografía climática de
precipitación media -ANE- |
Cartografía multivariable de las
dinámicas turísticas y
demográficas | Mapa de Paisaje
como herramienta de gestión
territorial

**NOTAS DE INVESTIGACION
Y RESEÑAS:**

Sensores remotos y de proximi-
dad para la monitorización del
suelo en áreas quemadas | Le
temps des liens | Planificación
adaptativa y resiliencia ante
sequías e inundaciones |
Diálogos entre geografía y
urbanismo



1542

Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad Zaragoza



Sensores remotos y de proximidad para el modelado y monitorización de la recuperación del suelo en áreas quemadas

Raquel Montorio Llovería

Sensores remotos y de proximidad para el modelado y monitorización de la recuperación del suelo en áreas quemadas

Raquel Montorio Llovería

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza,
Geoforest-IUCA, Instituto Universitario de Ciencias Ambientales,
Calle Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España
montorio@unizar.es

Resumen: Sens4Soil – “*Sensores remotos y de proximidad para el modelado y monitorización de la recuperación del suelo en áreas quemadas*” es un proyecto concedido en la convocatoria 2024 de Proyectos de Generación de Conocimiento del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (PID2024-160889OA-I00). Sens4Soil es un proyecto de investigación orientado a comprender la dinámica de recuperación de los suelos forestales afectados por incendios mediante la integración de sensores remotos (satélites) y sensores de proximidad (drones y espectro-radiómetros). El proyecto se basa en un enfoque multiescala y multisensor que permitirá generar modelos predictivos de propiedades edáficas, cartografías digitales y diagnósticos cuantitativos del estado del suelo en una perspectiva temporal amplia (1985–2025). Sens4Soil abordará especialmente el papel de variables coyunturales clave –como la severidad del fuego y las prácticas de restauración hidrológico-forestales– en la resiliencia edáfica, identificando métricas y protocolos operativos para la gestión de áreas quemadas.

Palabras clave:

Suelos forestales, incendios, resiliencia, sistemas de observación, cartografía digital de suelos.

Remote and proximal sensors for modeling and monitoring soil recovery in burned areas

Abstract: Sens4Soil – “*Remote and Proximal Sensors for Modeling and Monitoring Soil Recovery in Burned Areas*” is a project awarded under the 2024 *Proyectos de Generación de Conocimiento* call of the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities (PID2024-160889OA-I00). Sens4Soil is a research initiative aimed at understanding the recovery dynamics of forest soils affected by wildfires through the integration of remote sensors (satellites) and proximal sensors (drones and field spectroradiometers). The project is built upon a multiscale and multisensor approach that will enable the development of predictive models of soil properties, digital soil maps, and quantitative diagnostics of soil condition over a broad temporal window (1985–2025). Sens4Soil will pay particular attention to the role of key contextual variables –such as fire severity and post-fire hydrological-forest restoration practices– in shaping soil resilience, identifying operational metrics and protocols to support the management of burned areas.

Keywords:

Forest soils, wildfires, resilience, remote and proximal sensing, digital soil mapping.

Recibido: 22-11-2025. **Aceptado:** 24-11-2025.

DOI: https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.20257712640

SENS4SOIL – “*Sensores remotos y de proximidad para el modelado y monitorización de la recuperación del suelo en áreas quemadas*” es un proyecto concedido en la convocatoria 2024 de Proyectos de Generación de Conocimiento, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (PID2024-160889OA-I00). El trabajo se enmarca en el área de Tecnologías Medioambientales y está liderado por Raquel Montorio Llovería. Su duración es de tres años y cuenta con un equipo interdisciplinar especializado en análisis de incendios, teledetección y ciencia del suelo: Fernando Pérez Cabello, Juan Luis Mora Hernández, Cristian Iranzo Cubel, Sergio Larraz Juan y Pedro Martín Ortiz.

Tras su exposición al fuego, los bosques pierden o ven deterioradas muchas de sus funciones ecológicas, con repercusiones que perduran en el tiempo y se extienden más allá de los límites del propio espacio forestal. Como resultado, los incendios forestales se configuran no solo como un desafío medioambiental de primer orden, sino también como un problema con implicaciones sociales y económicas de gran alcance. Tras el desequilibrio inicial en las relaciones entre los diferentes componentes del ecosistema, se activan mecanismos naturales de compensación que conducen hacia un nuevo estado de equilibrio, condicionado por la resiliencia del sistema afectado (Pausas y Keeley, 2009). En este proceso, el suelo se erige como un elemento decisivo: la recuperación del suelo tras un incendio condiciona la resiliencia del ecosistema y determina la sostenibilidad de múltiples servicios ecosistémicos (Certini, 2005; Adhikari y Hartemink, 2016). Profundizar, por tanto, en el conocimiento de la dinámica de recuperación del suelo, sus ritmos y los principales factores que influyen en ella es determinante para evitar procesos de degradación, especialmente en un contexto como el actual, caracterizado por una intensificación de las métricas asociadas a los incendios forestales (i.e., extensión, intensidad, recurrencia) (Flannigan et al., 2009).

Aunque la vegetación ha sido estudiada extensivamente mediante imágenes de satélite, la dinámica del suelo sigue siendo menos conocida debido a su complejidad, su variabilidad espacial y la dificultad de disponer de series temporales largas de observación (Mulder et al., 2011). Sens4Soil responde a este reto mediante la integración de datos hiperespectrales de laboratorio, información multiespectral de drones e imágenes de satélite de media y alta resolución espectral. Además, el proyecto aborda el papel de variables coyunturales clave – como la severidad del fuego y las prácticas de restauración hidrológico-forestales – en la resiliencia edáfica. El proyecto toma como laboratorio territorial más de 150 incendios forestales registrados en Aragón entre 1985 y 2025.

El objetivo general de Sens4Soil es desarrollar un marco metodológico multiescalar que combine sistemas de observación remota y de proximidad y permita modelar y diagnosticar el

estado y la dinámica de recuperación de las propiedades edáficas en áreas afectadas por incendios forestales. El proyecto se estructura en cuatro objetivos. En primer lugar, desarrollará modelos predictivos basados en espectroscopía infrarroja para estimar propiedades clave del suelo, con especial atención al carbono orgánico y sus fracciones, dada su importancia en el balance carbono-fuente/sumidero. En segundo lugar, generará cartografía digital de suelos mediante técnicas de *Digital Soil Mapping* (DSM), combinando escalas espaciales (alta y media resolución espacial de drones y satélites, respectivamente) y evaluando incertidumbres. El tercer objetivo consiste en diagnosticar la resiliencia edáfica mediante la comparación sistemática entre áreas quemadas y controles no afectados. Por último, se analizará de forma explícita el papel de variables coyunturales –severidad del fuego y actuaciones de restauración– en los patrones de recuperación, evaluando métricas espectrales alternativas y su significado ecológico.

La metodología de Sens4Soil se estructura en torno a un proceso integrado de obtención de datos, análisis espectral y modelización digital. El proyecto articula tres bloques metodológicos principales: trabajo de campo, procesamiento espectral y temático y modelización de propiedades del suelo. En primer lugar, el trabajo de campo se realizará en áreas quemadas y de control, seleccionadas mediante técnicas previas de clasificación orientada a objetos y aprendizaje automático. Se muestrearán pares de unidades (quemado y control), registrándose simultáneamente imágenes multiespectrales, térmicas y LiDAR adquiridas con drones de ala fija y multirrotor. En segundo lugar, las analíticas de laboratorio permitirán caracterizar parámetros físico-químicos esenciales (textura, fertilidad, salinidad, carbonatos, fracciones de carbono orgánico), empleando protocolos especializados y espectroscopía infrarroja en continuo VIS–NIR–SWIR para la obtención de firmas espectrales de alta calidad. Finalmente, el procesamiento y análisis espectral se desarrollará mediante la integración de imágenes satelitales (Landsat, Sentinel-2, PRISMA, EnMAP) y datos LiDAR. Se generarán covariables ambientales, métricas de severidad del fuego y compuestos multitemporales destinados al desarrollo de modelos predictivos de propiedades edáficas, cartografía digital del suelo y diagnósticos de resiliencia posfuego. El estudio incorporará análisis estadísticos comparativos (e.g. ANOVA, Kruskal–Wallis) y la comparación entre estrategias de evaluación de la severidad (índices espectrales y técnicas de desmezclado) para aislar efectos y cuantificar dinámicas de recuperación.

Desde una perspectiva científico-técnica, Sens4Soil profundizará en el uso integrado de sensores y técnicas a diferentes resoluciones temporales, espaciales y espectrales, ampliará la disponibilidad de bibliotecas espectrales de suelos y contribuirá a consolidar protocolos de análisis espectral y cartografía digital del suelo. En términos temáticos, la propuesta aportará una visión

novedosa sobre la resiliencia de los ecosistemas forestales, identificando métricas robustas para evaluar la recuperación posfuego y determinar el papel de la severidad y de las actuaciones de restauración en la dinámica edáfica. El impacto socioambiental y aplicado del proyecto también se espera significativo. Sens4Soil proporcionará indicadores, metodologías, modelos y cartografías

aplicables a la evaluación operativa de áreas quemadas, contribuyendo al desarrollo de estrategias de gestión forestal basadas en información cuantitativa y técnicas de digitalización avanzada. Asimismo, se alinea con prioridades nacionales y europeas centradas en la sostenibilidad del suelo, la resiliencia frente a incendios y la transición digital en el ámbito forestal.

Bibliografía

- Adhikari, K. y Hartemink, A.E. (2016). Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma* 262, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., de Groot, W.J., Wotton, B.M. y Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 18(5), 483. <https://doi.org/10.1071/WF08187>
- Mulder, V.L., de Bruin, S., Schaepman, M.E. y Mayr, T.R. (2011). The use of remote sensing in soil and terrain mapping – A review. *Geoderma*, 162 (1-2), 1.19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.018>
- Pausas, J.G. y Keeley J.E. (2009). A burning story: The role of fire in the history of life. *BioScience* 59(7), 593-601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>