



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1436

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

Organiza





Visor multicriterio para la toma de decisiones en la producción forestal no maderable

VINUÉ VISÚS, D. (1) y URRECHO TORRES, J. (2)

(1) Geopixel

(2) *Universitat Politècnica de València*

Resumen

El desarrollo de la economía de los productos forestales no madereros adolece de sistemas de información integrados como ayuda en la toma de decisiones para diversificar la producción forestal. La integración de datos en un decisor multicriterio permite identificar las potenciales zonas de producción, comparar los rendimientos por tipo de aprovechamiento seleccionado y vigilar la inversión mediante información ambiental y de alarma ante eventos extremos.

Los datos de entrada del visor provienen de imágenes de satélite, estaciones de campo y repositorios de información oficiales y abiertos. El visor permite seleccionar las características de un punto óptimo de producción y utilizarlo como referencia de búsqueda de otras zonas con características similares en relación con los datos climáticos, de tipo de suelo y de calidad del sitio.

Además, el sistema emite alarmas relacionadas con la pérdida de calidad ambiental y de puntos calientes para la detección y seguimiento de los incendios forestales mediante sensores de campo e información MODIS.

Finalmente, además de como apoyo a la toma de decisiones en la producción de recursos forestales no madereros el sistema evalúa las existencias de biomasa en cada zona y su capacidad de sumidero de carbono para incluirla como un servicio ecosistémico añadido.

Palabras clave

Geoportal, biomasa, suelo, vigilancia ambiental

1. Introducción

Los usos y aprovechamientos no madereros en el bosque se producen tanto en enclavados de uso tradicional como bajo la cobertura forestal propiamente dicha y su vitalidad y permanencia están vinculados a la salud del bosque que los cobija. Además, los propios aprovechamientos deben asegurar la permanencia del bosque.

De esta forma, conocer el estado y la evolución forestal podrá indicar también las afecciones que los aprovechamientos puedan causarle, si los hubiere, permitiendo seleccionar las mejores prácticas correctivas y, a la inversa, pues al detectar afecciones en las producciones no madereras se pueden inferir afecciones en el medio forestal.

En las zonas de aprovechamiento no maderero se establece un binomio “bosque-aprovechamiento” que, mediante la recopilación de datos ambientales y de producción, sirve de referencia para la replicación de casos de éxito en otras zonas que cumplan las mismas condiciones que las monitorizadas y que permite promocionar y ampliar los usos no madereros más allá de su primer éxito inicial.

La monitorización del estado forestal se ha realizado en otras circunstancias mediante aplicaciones de la teledetección, por lo que esta tecnología puede ser adaptada a las necesidades de gestión de los usos no maderables. La teledetección permite mantener una metodología común y evita costes en la realización de trabajos *ad-hoc* en cada zona. Además, permite mantener un método de



replicación de los casos de éxito y la expansión del modelo de trabajo desarrollado en cada sitio.

Para proporcionar los datos necesarios de la calidad del sitio en su condición agroforestal se ha considerado adecuado vigilar el estado de la biomasa y el secuestro de carbono en el aspecto forestal, la calidad y mantenimiento de las condiciones edáficas en su aspecto agrario. Además, para proporcionar una alerta ante situaciones adversas se ha considerado incluir una estación de vigilancia ambiental en colaboración con información de incendios de satélite.

Los indicadores de la biomasa indican tanto el estado y evolución de la masa como la capacidad de generación de riqueza por su valor maderero accesorio y por su capacidad de secuestro de carbono como recepción de externalidades negativas que provienen de otras actividades.

Respecto a las características edáficas de cada zona forestal, éstas son concluyentes para el éxito del aprovechamiento seleccionado pues, en ocasiones, la capacidad de modificación del suelo es limitada o incluso nula. Por tanto, asegurar la calidad edáfica mediante contrastes con los valores de referencia proporcionará una garantía de continuidad del aprovechamiento forestal no maderero.

Además, la conservación del suelo forestal es una necesidad debido a su escasez y a su condición de recursos no renovable, pues su formación abarca periodos que no son asumibles para una gestión forestal sostenible. La erosión es uno de los principales factores de pérdida de suelo, que se ve agravada debida a los incendios forestales y la escorrentía inmediatamente posterior.

Finalmente, la información meteorológica, de temperatura de superficie y de detección de incendios puede permitir a los decisores adecuar sus labores y niveles de gestión de riesgo en tiempo real para preservar tanto la inversión en productos forestales no madereros como el bosque que los alberga.

Toda esta información debe ser presentada de forma sencilla, interactiva y accesible a los gestores del territorio, por lo se ha considerado la utilización de un geoportal de acceso libre.

Los condicionantes de las explotaciones forestales no madereras y las necesidades de gestión de información proporcionan las condiciones de trabajo definidas en los siguientes objetivos generales y particulares.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo consiste en proporcionar a los gestores del territorio la herramienta para gestionar la información ambiental adecuada para evaluar sus posibilidades de producción forestal no maderera, extender y promover la réplica de los trabajos en otras zonas mediante comparativas de datos y atender las situaciones extremas como herramienta de gestión y de la producción.

La información de salida del visor se obtiene mediante las capas de biomasa y carbono, de suelo, ambiental y de incendios. Para cada capa se establecen unos objetivos específicos:

Para la capa de biomasa establecen como objetivos específicos:

- definir un algoritmo basado en técnicas de aprendizaje automático para aplicarlo sobre imágenes Sentinel-2;
- evaluar la capacidad del algoritmo para replicar su uso en distintas zonas de aprovechamiento;
- obtener un mapa de distribución espacial de biomasa y contenido de



carbono sobre el área de estudio con una resolución de 10 m.

Para la capa edáfica se establecen como capacidades el poder:

- diagnosticar los posibles problemas en cada zona relacionados con el pH, los riesgos de salinización o las deficiencias de nutrientes, principalmente;
- evaluar la fertilidad, determinando la cantidad y disponibilidad de nutrientes esenciales que servirán a los productores para definir los mejores aprovechamientos y usos;
- optimizar el uso de fertilizantes para ayudar a los agricultores a aplicar la cantidad correcta evitando el uso excesivo o insuficiente.

Para la capa de alerta de afecciones y de incendios se establecen como objetivos específicos:

- incluir un histórico de valores para su utilidad en la planificación de producciones y tareas
- definir valores extremos que proporcionan una alarma
- incluir información procesada de satélite

Para el desarrollo del geoportal establecen como objetivos específicos:

- generar una herramienta para la gestión de datos geoespaciales para la publicación, búsqueda y acceso a información espacial mediante interfaces web interactivas

3. Metodología

Se ha diseñado un visor con capacidad para seleccionar una o todas las capas de visualización, que incluyen los valores de biomasa y secuestro de carbono, de valores edafológicos y de vigilancia ante incendios.

Se ha incluido la biomasa como parámetro de calidad ambiental, tanto por los valores ecosistémicos que genera y que son necesarios para permitir la producción de los recursos forestales no madereros como por su valor como sumidero de carbono.

Estas capas se han generado con distintos procedimientos:

Sensores remotos –para generar la capa de biomasa y la captura de carbono se ha utilizado la información de satélite mediante diversos sensores y misiones.

Biomasa - Se propone el cálculo de la biomasa de forma sencilla y eficaz, evitando costosos y largos inventarios mediante la aplicación de métodos de aprendizaje automático sobre los valores de reflectividad de las imágenes de Sentinel-2 para obtener un mapa de biomasa, segmentando por clases de edad.

Este método se considera adecuado para poder realizar una gestión forestal precisa y asequible en términos de coste, esfuerzos, consumo de recursos y capacidades de computación y proporciona una ventaja cualitativa respecto de métodos anteriores de estimación de la biomasa basada en la teledetección (VINUÉ *et al.*, 2019; 2022).

Se han entrenado los GPR con las bandas espectrales de Sentinel-2 desde la 2 a la 8A (de 490 a 865 nm), ambas incluidas, y las bandas SWIR 11 (1.610 nm) y 12 (2.190 nm) como entradas, mientras que la biomasa total representa la salida. No se incluyen bandas sintéticas adicionales porque los métodos no paramétricos pueden extraer toda la información relevante de las bandas sin la intervención del usuario.

Los datos de campo se han dividido aleatoriamente en n subconjuntos con valores de biomasa bien distribuidos. Se han utilizado $n-1$ subconjuntos para el



entrenamiento del algoritmo en cada iteración y un subconjunto se utilizó para la validación de los resultados. El objetivo de las iteraciones es la generación de todas las combinaciones posibles entre los subconjuntos de entrenamiento y de validación para que ésta sea lo más robusta.

Para evitar la influencia de los efectos de la iluminación relacionados con la geometría y los ángulos de adquisición en los valores de reflectividad se ha trabajado con las fechas más próximas al solsticio de verano. Las imágenes de Sentinel-2A se han descargado en un nivel de reflectividad 2A (reflectividad de superficie tras corrección atmosférica).

Los inventarios de biomasa se han obtenido del IFN. En las ocasiones en que se han realizado por medios propios han seguido los parámetros del Inventario Forestal Nacional (IFN). Sobre cada zona de estudio se han aplicado las ecuaciones alométricas definidas para cada especie, obteniendo un conjunto de datos de biomasa como verdad-terreno.

Finalmente, se ha aplicado un método de relación estadística entre los valores de satélite y los de campo mediante procesos gaussianos (GPR). El GPR es un método muy adecuado para el análisis en teledetección, basado en la densidad de probabilidad compartida, típicamente una distribución gaussiana, ya que no está limitado por el gran número de parámetros necesarios para la implementación de métodos como las redes neuronales y sus requisitos computacionales son menos exigentes que los basados en métodos de inversión píxel a píxel.

Secuestro de carbono-La reserva total de biomasa es considerada como secuestro de carbono en su forma equivalente de CO₂ (CO₂ eq.). Se ha calculado una fracción de carbono de la biomasa seca, según estudios previos, de 0,4799 (IBÁÑEZ *et al.*, 2002; MONTERO *et al.*, 2013). Tras esto, se ha considerado el peso molecular del CO₂ y la relación estequiométrica entre el carbono y el CO₂ para obtener la cantidad total de CO₂ eq. De esta forma el coeficiente de transformación entre biomasa y CO₂ eq. es de 1,759.

Temperatura de superficie –se ha deseado proporcionar una herramienta de prevención de afecciones y de alerta temprana ante incendios forestales en sinergia con una red interconectada de monitorización de incendios forestales.

Para ello se ha incluido una capa procesada de temperatura de superficie y de detección de incendios de MODIS, que tendrá el triple uso de análisis fenológico y de producción, de vigilancia ante incendios y de análisis histórico de las condiciones ambientales.

Sensores próximos – Como apoyo a la capa de vigilancia de afecciones e incendios de teledetección remota se ha diseñado e implantado un sistema de sensorización y monitorización de los parámetros ambientales. Además de controlar las condiciones de producción los sensores de proximidad se han ubicado en zonas estratégicas para gestionar el riesgo por incendio. De esta forma, junto con la vigilancia y alerta temprana necesaria se indica a los productores la situación fenológica, lo que ayudará en la toma de decisiones durante las labores de gestión del territorio y de recolecta.

Cada sensor establece la comunicación con el exterior de forma autónoma, aportando gran robustez al sistema y reduciendo los costes. Este funcionamiento independiente se consigue gracias a que emplea un sistema de comunicación en la banda 868MHz con protocolo Sigfox, que cuenta con cobertura a nivel nacional ya instalada. Esta red inalámbrica de bajo consumo (Low Power Wide Area Networ -



LPWAN), funciona con tecnología de transmisión Ultra Narrow Band (UNB) consistente en emplear canales estrechos del espectro y alcanzar grandes distancias con un requerimiento mínimo de energía, dando como resultado que cada sensor pueda operar durante años sin necesidad de cambio de batería interna. Además permite las comunicaciones punto a punto y vía satélite.

Finalmente, la capacidad de dispersión y comunicación de los sensores en el territorio permite la generación de una red de sensores fácilmente actualizables y extensible mediante la incorporación de otros sensores.

Valores edafológicos – Se ha realizado un análisis de los suelos en laboratorio primera instancia obteniendo un valor de referencia para los análisis futuros y poder monitorizar el mantenimiento de los valores de referencia o sus modificaciones. Esto indicará las afecciones, positivas o negativas que el aprovechamiento seleccionado realiza sobre los suelos forestales y permitirá garantizar la estabilidad de los suelos con medidas preventivas o correctoras de las labores del cultivo seleccionado.

Junto a la ficha de análisis edáficos se ha incluido la capa de mapas del suelo de España con resolución de 250m ofrecidos por el Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC).

Geoportal -Un geoportal es una herramienta para la gestión de datos geoespaciales, permitiendo la publicación, búsqueda y acceso a información espacial mediante interfaces web interactivas.

Se ha empleado Geonode como plataforma principal para gestionar y publicar los datos geoespaciales debido a su interfaz intuitiva y sus herramientas avanzadas, cumpliendo con estándares establecidos por el OGC (*Open Geospatial Consortium*), como WMS (*Web Map Service*) y WFS (*Web Feature Service*), que garantizan la interoperabilidad entre sistemas.

Geonode proporciona una interfaz integral que centraliza la gestión de datos, la publicación de mapas y la configuración de permisos. GeoServer, incluido en la arquitectura estándar de Geonode, opera dentro de un contenedor Docker y ofrece servicios WMS y WFS desde una URL pública accesible, simplificando la configuración del sistema y eliminando dependencias complejas.

La implementación del geoportal se ha realizado en un servidor VPS configurado con Ubuntu, utilizando Docker para desplegar tanto Geonode como GeoServer. Docker ha facilitado la gestión del entorno, asegurando una instalación limpia y consistente. Tras preparar el servidor se han instalado las dependencias necesarias para habilitar los contenedores aislados que ejecutan Geonode y GeoServer. Posteriormente, se han integrado ambos servicios para trabajar de manera sincronizada. Como parte de la configuración de seguridad, se han habilitado conexiones HTTPS mediante certificados SSL y se han implementado políticas de acceso basadas en roles dentro de Geonode para proteger los datos.

Posteriormente, se ha verificado la funcionalidad del sistema validando la carga de capas desde Geonode, el acceso a servicios WMS desde clientes como QGIS y la visualización de mapas en la interfaz web. Las capas de información han sido cargadas directamente en la interfaz del geoportal por el administrador del sistema utilizando Geonode para organizar y gestionar los datos de manera eficiente.

Las capas de vegetación, composición del suelo y meteorología e incendios se han

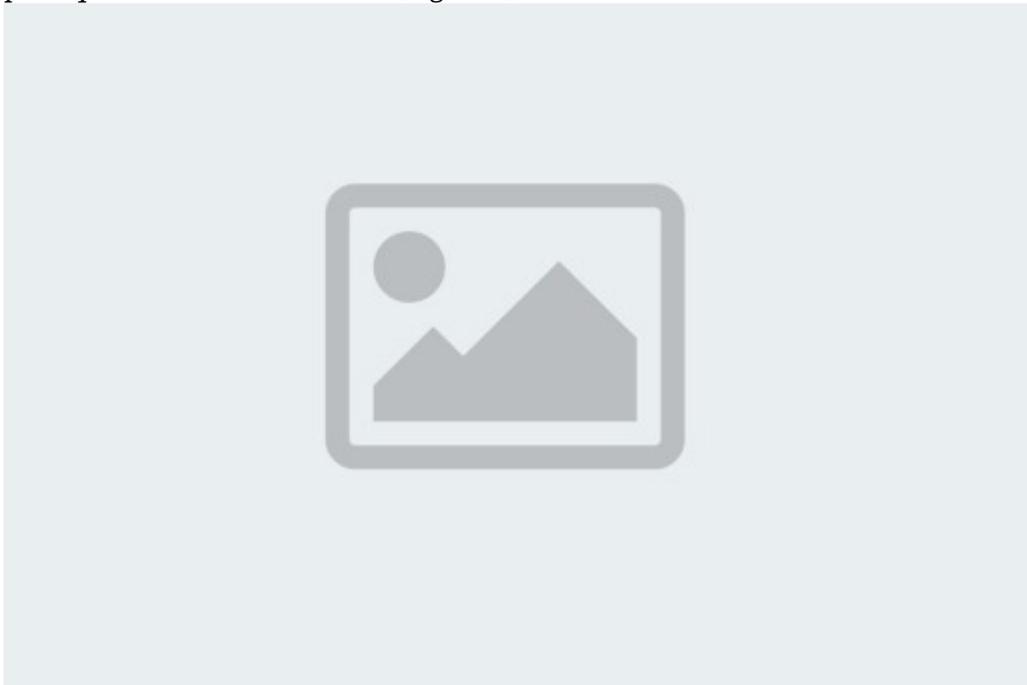
representado tanto en formato vectorial como ráster, lo que permite una gestión integral y versátil para análisis detallados y una visualización optimizada.

4. Resultados

Biomasa y contenido en carbono– Se ha obtenido un único algoritmo genérico utilizando todos los puntos de datos del terreno para cada zona y especie principal. Se han entrenado los GPR con las bandas espectrales de Sentinel-2 desde la 2 a la 8A (de 490 a 865 nm), ambas incluidas, y las bandas SWIR 11 (1.610 nm) y 12 (2.190 nm) como entradas, mientras que la biomasa total representa la salida. No se incluyen bandas sintéticas adicionales porque los métodos no paramétricos pueden extraer toda la información relevante de las bandas sin la intervención del usuario.

Para la calibración y para incluir la máxima variabilidad de los valores de reflectividad en la base de datos, se han seleccionado al azar un número entre cinco y diez parcelas de suelo desnudo. Estas parcelas tienen un rango de NDVI máximo de 0,11 por lo que se garantiza la ausencia de vegetación significativa.

Los datos de campo se dividieron aleatoriamente en n subconjuntos con valores de biomasa bien distribuidos. Se utilizaron $n-1$ subconjuntos para el entrenamiento del algoritmo en cada iteración y un subconjunto se utilizó para la validación de los resultados. El objetivo de las iteraciones es la generación de todas las combinaciones posibles entre los subconjuntos de entrenamiento y de validación para que ésta sea más robusta (Figura 1).



Se ha realizado un análisis estadístico de los datos que recapitula la diversidad de biomasa en cada una de las zonas de estudio en un diagrama de cajas y bigotes que también ayuda a la detección de valores atípicos. Se analizan en cada caso las diferencias entre la media y la mediana y la diferencia entre la mediana y el primer y tercer cuartil para determinar la asimetría como comprobación rutinaria, si bien se considera que el GPR proporciona el peso específico en las zonas de mayor distribución de probabilidades e incluso con una asimetría menor en la distribución de la biomasa.

El rendimiento se evalúa con el error medio absoluto de la raíz cuadrada (RMSE) y

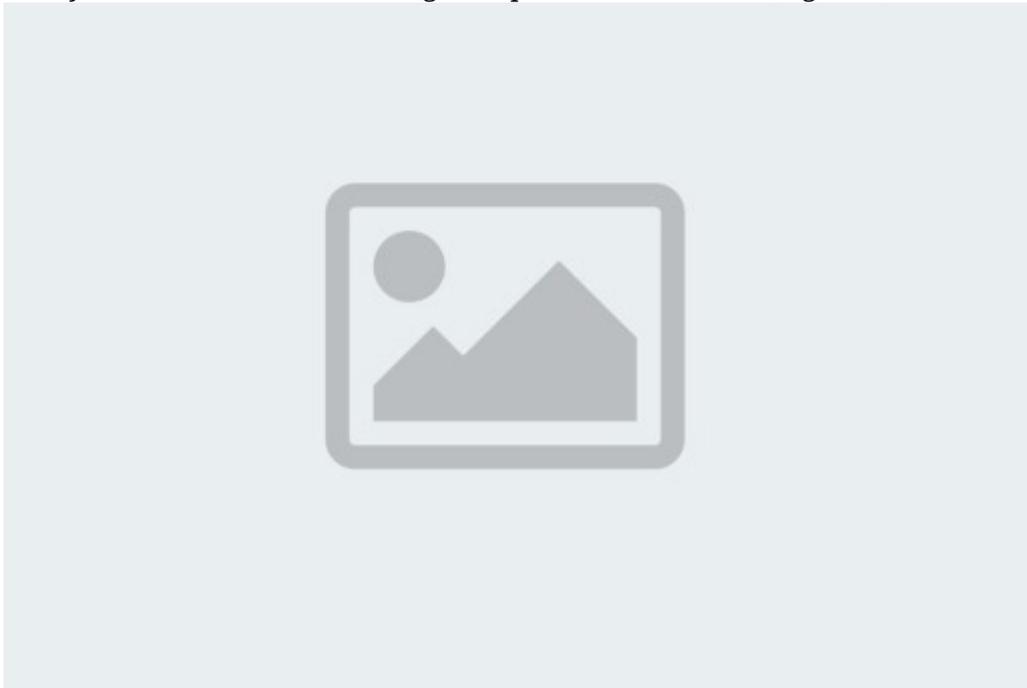


el coeficiente de determinación (R^2) como indicadores generales de precisión. Se ha obtenido un único algoritmo genérico utilizando todos los puntos de datos del terreno para cada zona y especie principal. Para comprender el ajuste entre los valores observados y los predichos, se ha incluido una línea de regresión del eje mayor (MAR, *Major Axis Regression*) correspondiente a la pendiente bien ajustada.

Se ha generado en el visor además una capa de contenido en carbono que, tras el cálculo inicial, se recalculará cada cinco años asumiendo las tasas de crecimiento para cada especie y estructura forestal, dando un valor de compensación de carbono a cada territorio y proporcionando información económica además de ambiental.

Valores edáficos– Se ha realizado un vínculo entre el geoportal y la aplicación de los mapas del suelo de España con resolución de 250m ofrecidos por el Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC) para apoyar sus flujos de trabajo de cartografía que se pueden consultar desde el proveedor ESRI (<https://www.arcgis.com/apps/instant/portfolio/index.html?appid=701d5c4a6dfb49c591adc5f72ceae591>).

Además, se han realizado análisis de suelos en laboratorio para establecer los parámetros iniciales de control, que junto con la información del geoportal se incluye también en fichas descargables por zona de estudio (Figura 2).



Sensores de proximidad y vigilancia meteorológica- Los sensores integran datos locales en tiempo real que se recogen, almacenan y muestran en tiempo real. Cada sensor es totalmente independiente, capaz de medir, analizar y enviar de forma autónoma información y alertas. Estas alertas se han definido específicamente para cada zona, de común acuerdo con los productores y sus necesidades de gestión. Se han incluido diversos índices de incendios, como el FWI (*Fire Weather Index*) y se accede al panel de control en un alojamiento externo desde el propio visor(Figura 3).



Figura 3: módulo de vigilancia - incluye un análisis temporal de la temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad, precipitación, gases e índices de incendios junto con la consola de recepción de los sensores.

Vigilancia de incendios -Se ha incluido un modelo de detección de incendios basado en los productos NASA FIRMS (*Fire Information for Resource Management System* - <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>). En cada caso se puede seleccionar la creación de una alerta según la proximidad que se desee, por ejemplo 100 Km a la redonda desde un punto o 25 Km en la extensión de un buffer(Figura 4).

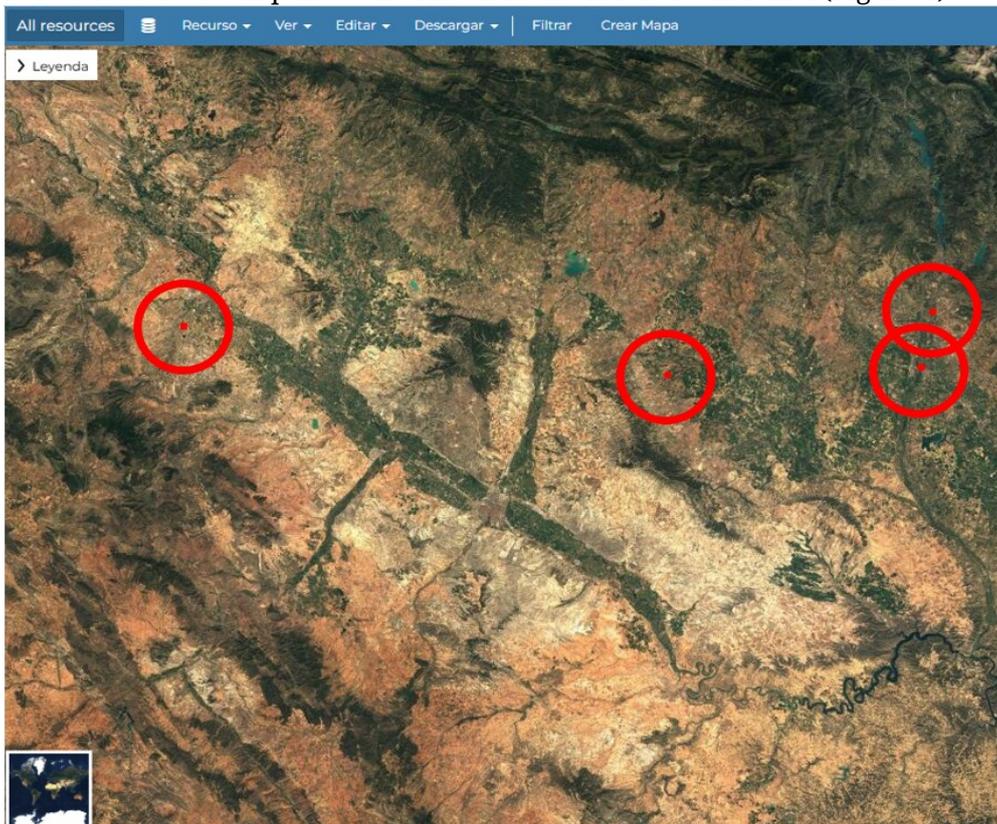


Figura 4: módulo de detección de incendios.

Se ha incluido también un módulo de detección de puntos calientes “hotspots” desde MODIS o Sentinel-3 según su disponibilidad temporal y programado en Python. Este módulo indica la proximidad al municipio de un incendio y proporciona alertas tempranas a los gestores.

Visualización de la información –toda la información de plataformas, análisis, sensores remotos y de proximidad se ha volcado en un geportal desde donde se puede realizar una monitorización continua de los parámetros ambientales y la detección inmediata de los cambios en el ambiente (Figura 5).

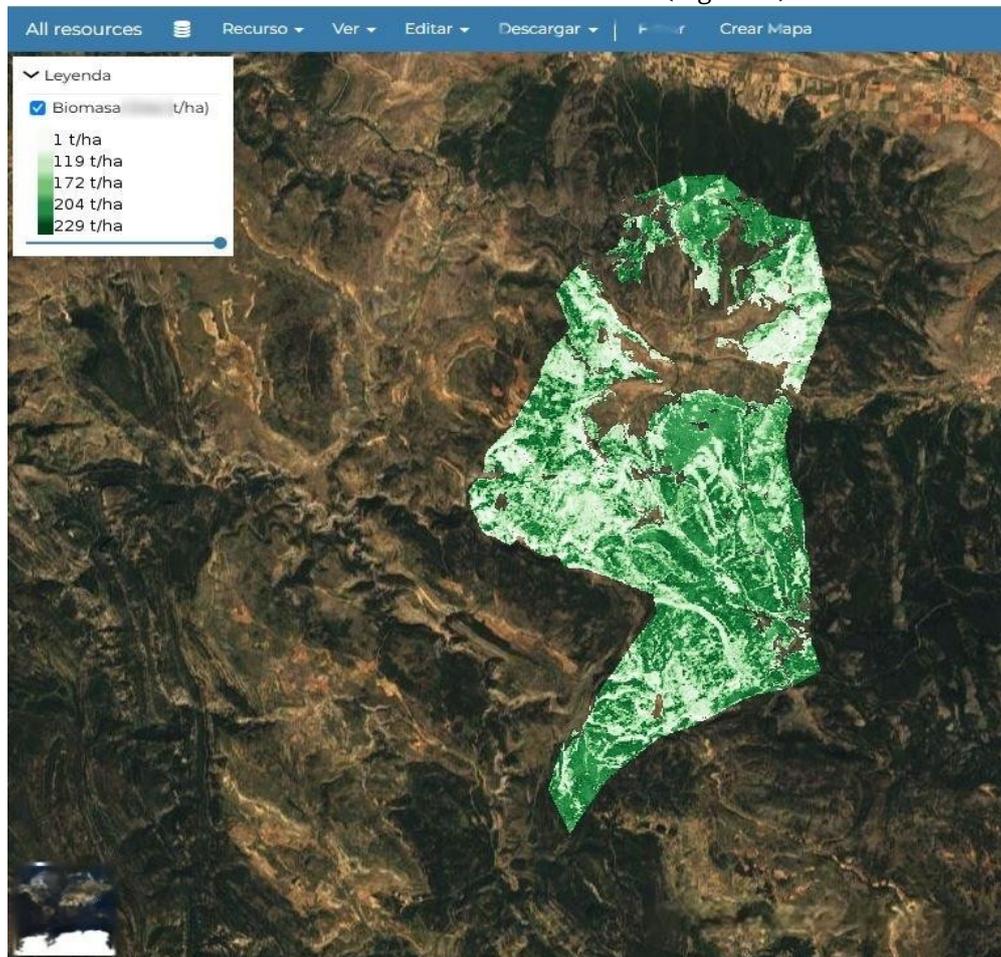


Figura 5: selección de capas para su descarga o visualización

Las funcionalidades del geportal incluyen:

- generación de una capa cartográfica actualizada de la biomasa total por especie y estrato
- generación de una capa de valores edáficos
- posibilidad de descarga de datos en formatos vectoriales y alfanuméricos
- visualización de datos meteorológicos históricos
- generación de capas multitemporales de riesgo
- visualización zonificada del riesgo de incendio
- gestión de notificaciones y alertas a usuarios

5. Discusión

Biomasa y carbono secuestrado –Se ha adaptado una metodología rentable y sencilla para evaluar las existencias de biomasa mediante métodos de regresión de procesos gaussianos sobre los datos de reflectividad de superficie de Sentinel-2 y los inventarios forestales. De este modo, la biomasa y las reservas de carbono, expresadas como CO₂ eq. secuestrado, pueden calcularse directamente en cada zona de estudio.

Se ha simplificado el análisis mediante la asunción de una única clase eliminando únicamente los muestreos con un valor de fracción de cabida cubierta menor del



25% y los parcelas de menos de 10 tn/ha, lo que implica un único kilogramo de materia seca por metro cuadrado. Ambos tipos de parcela proporciona valores de reflectividad cercanos a una curva espectral típica de suelo y perjudican y falsean el ajuste.

En los diez casos de estudio realizados hasta el 9CFE, entre 52% y el 86% de la variabilidad de cada una de las zonas de estudio ha podido ser explicada, a pesar de la gran diferencia entre fisiografía y especies de cada zona y contando con sólo una parcela de muestreo por cada kilómetro cuadrado. En estas zonas el rango de biomasa se sitúa entre 5 y 358 Mg*ha⁻¹.

Edafología – los análisis puntuales de suelo al comienzo de cada servicio de análisis permiten ajustar la verdad-terreno con los valores obtenidos por los servidores, proporcionando una capacidad de seguimiento de la salud del suelo forestal.

Alertas – las alertas meteorológicas disponibles para el usuario pueden particularizarse para cada zona de trabajo. Además, se incluyen valores de temperatura de superficie y de detección de incendios en tiempo cuasi-real desde satélite.

Visualización – Toda la información está disponible en un geoportal accesible sencillo y con recopilación de información histórica.

Obtención de informes -Los resultados de cada zona seleccionada en el visor se presentan en fichas de caracterización del territorio, incluyendo la distribución de la biomasa, el ajuste del modelo de aprendizaje y los mapas de densidad de biomasa en cada municipio, los valores de suelo y el histórico meteorológico junto con los índices de alertas.

6. Conclusiones

Este geoportal ofrece una solución centralizada para el acceso y la gestión de datos geoespaciales. Los usuarios pueden interactuar con herramientas intuitivas para la visualización y el análisis de mapas, beneficiándose de un sistema seguro y fácil de usar. Además, es un repositorio de información accesible para productores, gestores y entidades municipales, que pueden descargar y utilizar los datos según los permisos definidos

Esta información en tiempo real del territorio que permite también la toma de decisiones a nivel municipal en lo relacionado con la gestión del riesgo de incendios y de las labores de autoprotección llegado el caso.

Con este doble uso la necesidad del productor se convertirá también en una externalidad positiva para los municipios que acojan este tipo de aprovechamientos forestales no madereros.

7. Bibliografía

Vinué-Visús, D.; Coll-Aliaga, E.; Oliver-Villanueva, J.-V. Remote Sensing Assessment of Biomass Evolution Depending on Forest Management. Proceedings 2019, 19, 3. DOI: 0.3390/proceedings2019019003

Vinué-Visús, D.; Ruiz-Peinado, R.; Fuente, D.; Oliver-Villanueva, J.-V.; Coll-Aliaga, E.; Lerma-Arce, V. Biomass Assessment and Carbon Sequestration in Post-Fire Shrublands by Means of Sentinel-2 and Gaussian Processes. Forests 2022, 13, 771. <https://doi.org/10.3390/f13050771>