



9CFE-1741

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

Organiza





El Sistema de Información Territorial EIKOS para el seguimiento de los ecosistemas

RUIZ FRANCO, B. (1), ALEZA ROJAS, B. (2), BERGER B. (2), BRAVO LLORENTE, R. (2), BRIONES GARCÍA, P. (2), CHECA ALONSO, M.J. (2), DIAZ ROMERO, M. (2), ESCUDERO BARBERO, R. (2), FIERRO GARCÍA, B. (2), GONZÁLEZ NOVA, J.P. (2), IZQUIERDO CUADRADO, C. (2), LERNER CUZZI, M. (2), LUENGO ANTOÑANZAS, A. (2), PUEBLA ESTRADA, M. (2), SILVA PATIÑO, J.M. (2) y SUAREZ RODRIGUEZ, M. (2).

(1) Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación (MITECO).

(2) TRAGSATEC.

Resumen

La Dirección General de Biodiversidad Bosques y Desertificación (DGBBD) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) ha puesto en marcha un Sistema de Información Territorial (EIKOS) que integra diferentes fuentes de datos, principalmente los obtenidos por observación remota (datos Copernicus y LiDAR) y datos *in situ*, disponibles en el Inventario del Patrimonio Natural y la Biodiversidad. Para el procesado masivo de las series de imágenes Sentinel de Copernicus, se emplea técnicas de teledetección y bigdata que, en combinación con algoritmos de inteligencia artificial, permiten realizar la modelización y el seguimiento de los distintos tipos de cubiertas y ecosistemas de forma permanente y con un alto grado de automatización. La plataforma EIKOS, financiada con el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), irá dotándose de las herramientas necesarias para poner esta información territorial accesible a las AAPP) y al ciudadano de forma abierta e interoperable. La puesta en marcha de este sistema supone un importante reto de innovación y una gran oportunidad para avanzar en el proceso de transformación digital.

En su primera fase de desarrollo se ha profundizado en la monitorización de los ecosistemas forestales con el módulo de anomalías y alertas tempranas de cambios, y la actualización anual del Mapa Forestal de España.

Palabras clave

Observación de la tierra, uso del suelo, cobertura, teledetección, mapa forestal

1. Introducción

Disponer de un sistema de información territorial robusto tiene múltiples aplicaciones para mejorar el conocimiento del territorio, así como para el seguimiento e implantación de políticas medioambientales: en las evaluaciones de las Directivas de naturaleza, en los estudios de impacto ambiental, corredores ecológicos, infraestructura verde, servicios de los ecosistemas, proyectos de restauración y en el desarrollo de cuentas ambientales.

En concreto, el Reglamento UE 2018/841, sobre la inclusión de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero resultantes del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura en el marco de actuación en materia de clima y energía hasta 2030 y por el que se modifican el Reglamento (UE) n° 525/2013 y la Decisión n° 529/2013/UE (conocido como Reglamento LULUCF) establece, a partir del año 2021, la obligación de informar anualmente, de forma geográficamente explícita, sobre los cambios de uso de la tierra entre los que se encuentran las forestaciones y reforestaciones.

En esta misma línea, la modificación del Reglamento (UE) n.º 691/2011 establece la



obligación de reportar los cambios en los ecosistemas cada 3 años, siendo en año de referencia, 2024. Además, en lo referente a la introducción de nuevos módulos en las cuentas económicas medioambientales, obliga a tener datos actualizados del territorio, y en concreto a reportar el total de las superficies repobladas anuales, diferenciando además si estas pasan a formar parte de bosques maderables, bosques no maderables u otras tierras boscosas.

Además, el Reglamento (UE) n.º 2024/1991 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de junio de 2024, relativo a la restauración de la naturaleza, establece nuevas obligaciones de información geográfica para evaluar los progresos realizados en la aplicación del plan nacional de restauración, en el establecimiento de las medidas de restauración y en la consecución de los objetivos y el cumplimiento de las obligaciones establecidas en el Reglamento.

En este contexto, la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación (DGBBD) está creando un Sistema Integrado de Información, en el que se incluye un módulo específico: el Sistema de Información Territorial (EIKOS), que permita una continua monitorización y seguimiento de los cambios acontecidos en el territorio, basado en la utilización de las tecnologías de observación y procesamiento masivo de datos para poder cumplir con las obligaciones de información a las que tiene que dar respuesta.

EIKOS permite automatizar el tratamiento de los datos georreferenciados desde la entrada, gracias a un editor distribuido, el análisis, mediante cuadros de mando y estadísticas al vuelo; así como puesta a disposición, a través de una interfaz de programación de aplicaciones (API) o mediante servicios de mapas interoperables, en especial los considerados de alto valor según la Directiva (UE) 2019/1024 del parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2019 relativa a los datos abiertos y la reutilización de la información del sector público y que se traspone a la legislación española a través la Ley 37/2007, de 16 de noviembre.

2. Objetivos

La Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación, consciente de los requisitos de información que demanda la sociedad y las obligaciones de información europeas, desarrolla un módulo de información territorial en el Sistema Integrado de Información de la Biodiversidad (en adelante, SIIB) cuyas funciones son la gestión, armonización, análisis y difusión de la información geográfica disponible en el Inventario Español del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad (en adelante, IEPNB).

Por la importancia del módulo de información territorial, se ha considerado oportuno que tenga una denominación propia: EIKOS (*verosimilitud*). Este módulo permitirá integrar en el SIIB toda la información geográfica permitiendo su comparabilidad en el espacio y en el tiempo, así como disponer de: la capacidad analítica para facilitar la toma de decisiones, un sistema de alerta para detectar los cambios en la distribución y estructura de los ecosistemas y las herramientas necesarias para realizar proyecciones y simulaciones en diferentes escenarios.

Con el fin de cumplir los objetivos antes mencionados, EIKOS, permitirá:

- **Conocer el territorio con una base territorial única, coherente y continua.** Se mejora la eficiencia en los flujos de conjuntos de datos cartográficos al Banco de Datos de la Naturaleza mediante la edición distribuida. Por ejemplo, con la creación de módulos para la actualización

de las vías pecuarias y las principales actuaciones en el territorio como las repoblaciones.

- **Generar cartografía temática.** Se actualizan los productos cartográficos temáticos de referencia producidos por la DGBBD para la aplicación de las políticas nacionales y europeas (la Foto Fija del Mapa Forestal de España, cartografía de ecosistemas utilizando las clasificaciones europeas de MAES-EUNIS, etc.), mediante procesos semiautomáticos.
- Realizar una **continua monitorización**, a partir del sistema de alertas que permitan tomar las mejores decisiones. Para ello se desarrolla un módulo de anomalías y alerta temprana para detectar cambios en los ecosistemas naturales gracias al procesamiento de datos de sensores remotos con técnicas de análisis masivo de datos de Data Science y Data Analytics.
- Disponer de **servicios interoperables con otras plataformas** ya existentes en particular con el SIGPAC (SIEX), IGN y Catastro.
- Realizar **proyecciones y simulaciones** en diferentes escenarios.

3. Metodología

Como parte del SIIB, EIKOS está incorporando los conjuntos de datos espaciales en una Plataforma. A continuación, se detallan las fases necesarias para lograr este objetivo dentro de la arquitectura del Sistema (Figura 1):

- **Ingesta** del dato, incorporación de todos los conjuntos de datos espaciales prioritarios del IEPNB y los necesarios para la generación de alertas.
- **Procesado** del dato como, por ejemplo, validación de datos, automatización de cálculos, análisis de imágenes de satélite, optimización de cálculos, analítica espacial, entre otros mediante PostgreSQL, PostGIS, Python y Spark.
- **Almacenamiento** de datos alfanuméricos y cartográficos vectoriales (mediante PostgreSQL y PostGIS) y datos cartográficos raster (en formato COG).
- **Servicio** del dato para visualizar datos cartográficos (WMS, WFS, WMTS y Tile Vectors) mediante GeoServer y datos alfanuméricos (API RESTful) con PostgREST.
- **Difusión** del dato, tanto de la cartografía (OpenLayers) y su catálogo de metadatos correspondiente (ckan) en el Portal del IEPNB.

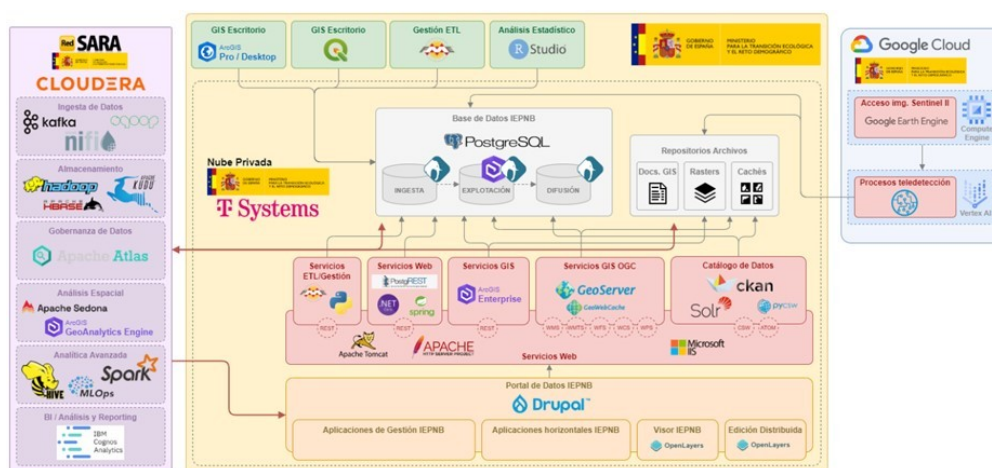


Figura 1. Arquitectura del SIIB



Una vez almacenada esta información, en EIKOS se ha desarrollado un sistema automático de monitorización de los ecosistemas a nivel nacional, basado en el análisis de datos de observación remota, que proporcione a los organismos gestores información objetiva, periódica y sistemática sobre los cambios significativos producidos en las cubiertas.

Para conseguir este objetivo, se han desarrollado en una primera fase, los módulos de observación remota centrados en la monitorización de la superficie forestal a partir del análisis de la evolución espacio-temporal de índices espectrales, derivados de las imágenes de satélite Sentinel (programa Copernicus) y de distintas fuentes de información de referencia (principalmente IEPNB).

Dentro de este marco, las alertas en la superficie forestal reflejan los cambios ocurridos en una masa forestal, ocasionados por actividades antrópicas o naturales, y que se ven reflejados en las imágenes como una pérdida de actividad vegetativa (cortas, incendios, cambios de uso, etcétera). Este producto se genera de manera automática mensualmente (para las alertas mensuales) y anualmente (para las alertas anuales), a mes y año vencido, respectivamente, para todo el territorio nacional, representando la superficie forestal susceptible de haber sufrido un cambio significativo en su cubierta vegetal. A continuación, se detalla la metodología utilizada.

Alertas mensuales, anuales y anuales clasificadas sobre la superficie forestal:

El módulo de anomalías y alertas genera de manera semiautomática una capa de alertas mensuales, anuales y clasificadas para la superficie forestal, proporcionando información sobre las áreas forestales, susceptibles de haber sufrido una pérdida significativa en la cubierta vegetal (pérdida de actividad vegetativa) respecto a unas condiciones de referencia.

Las **alertas mensuales** se obtienen comparando la actividad vegetativa de las cubiertas del mes en curso, observadas en las imágenes del satélite Sentinel-2 del programa europeo COPERNICUS, con respecto a sus condiciones de referencia. Estas condiciones de referencia sintetizan la dinámica de la vegetación a lo largo de los últimos seis años y están definidas por el valor medio y su desviación estándar. Su cálculo se basa en la evolución del índice de vegetación de diferencia normalizado, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, ROUSE et al., 1973), correlacionado con la actividad vegetativa y la productividad primaria en los ecosistemas terrestres (CABELLO et al., 2012). Además, la superficie afectada por el fuego se obtiene a partir del índice de incendio BAIS2 (*Burn Area Index Sentinel-2*, FILIPPONI, 2018), e información auxiliar sobre perímetros de incendios del servicio de EFFIS (*European Forest Fire Information System*) y puntos calientes (*hotspots*) de FIRMS (*Fire Information for Resource Management System*).

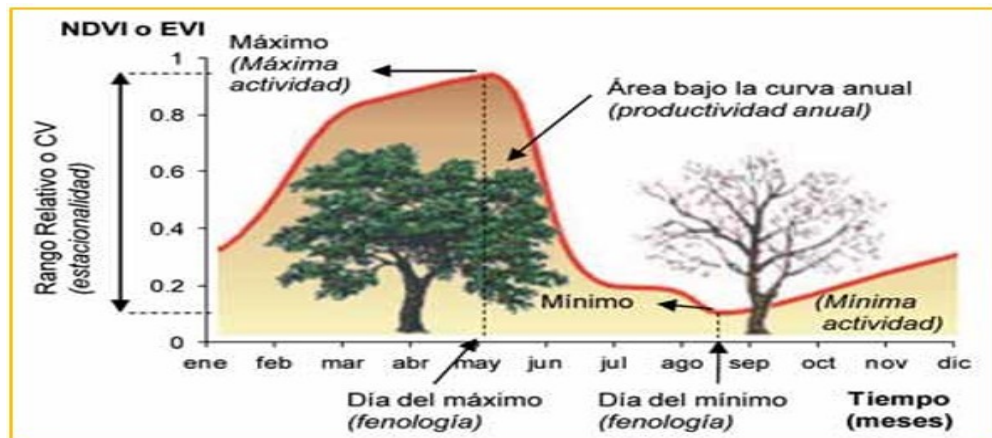


Figura 2. Evolución del índice de vegetación, NDVI, a lo largo del año (CABELLO et al., 2012).

Las **alertas anuales** proceden de la consolidación anual de las alertas mensuales en función del tipo de cambio y la frecuencia de ocurrencia. Se diferencian dos tipos de alertas: Incendio, se incluyen directamente desde la capa de alertas mensuales; Pérdida de vigor vegetal, cuando su frecuencia mensual a lo largo del año es igual o mayor a tres meses consecutivos.

Las **alertas anuales clasificadas** en la superficie forestal reflejan los principales cambios ocurridos en una masa forestal, ocasionadas por actividades antrópicas o naturales (pérdidas de vegetación, conversión a no forestal e incendio) y se generan por geoprocesamiento a partir de las alertas anuales e información de referencia del IEPNB y su revisión posterior por fotointerpretación, para verificar la precisión del producto.

El flujo de procesos para el cálculo de las anomalías y las alertas se ilustra en la Figura 3, y se describe a continuación:

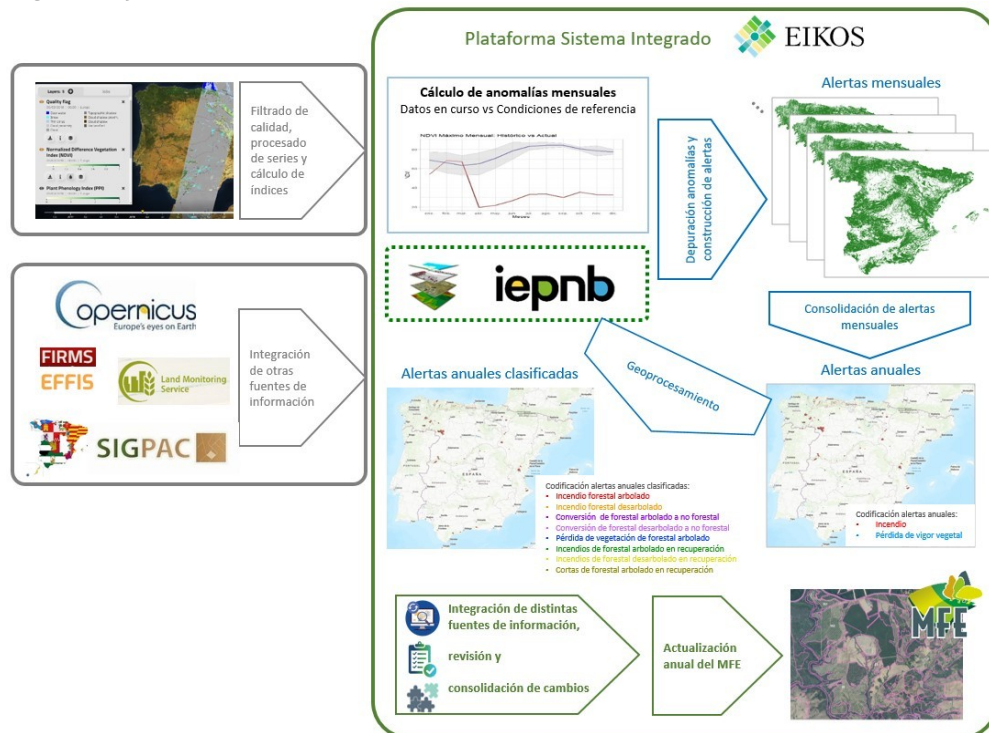


Figura 3. Flujo de datos y procesos para el cálculo de las alertas mensuales, anuales

y clasificadas en la superficie forestal

- **Selección, pre-procesado inicial de las imágenes Sentinel-2 y cálculo de índices espectrales.**

Los datos de observación remota utilizados corresponden a la colección de imágenes Sentinel-2 MSI (Level-2A). Con el fin de eliminar la presencia de valores “no válidos” de las imágenes (producidos por nieve, nubes y sombras), se enmascaran los píxeles correspondientes a las clases de nieve, hielo y sombras de la banda de calidad SCL (*Scene Classification Layer*) y los píxeles con probabilidad de nube superior al 50% del producto “Cloud Probability” (Earth Engine, 2024), del conjunto de datos de probabilidad de nubes de Sentinel-2.

Adicionalmente, se genera una banda de calidad que informa sobre la “disponibilidad de datos”, que representa el porcentaje de imágenes de buena calidad en la serie temporal. Ésta es utilizada para filtrar aquellos píxeles con un número bajo de observaciones.

En la Tabla 1 se resumen los índices espectrales calculados para la detección de las alertas.

Tabla 1. Índices espectrales para la detección de alertas EIKOS.

Índice	Formulación	Descripción y uso
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (ROUSE et al., 1973)	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	Índice de vegetación correlacionado con la actividad vegetativa de las plantas. Utilizado en la identificación de las alertas por pérdidas de vigor vegetal.
<i>Modified Normalized Difference Water Index</i> (XU, 2006)	$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$	Índice de agua. Utilizado en este caso para filtrar agua, nieve y brumas.
<i>Burn Area Index Sentinel-2</i> (FILIPPONI, 2018)	$BAIS2 = \left(1 - \frac{\sqrt{RE2 * RE3 * NIR}}{RED} \right) * \left(\frac{SWIR2 - NIR}{\sqrt{SWIR2 + NIR}} \right)$	Índice de incendios adaptado a Sentinel-2. Permite identificar las superficies afectadas por el fuego.
<i>Bandas espectrales utilizadas en el cálculo de los índices: R, rojo; RE, borde del rojo; NIR, infrarrojo cercano; SWIR, infrarrojo medio</i>		

Con el fin de minimizar la influencia de los píxeles con valores anómalos (afectados por bruma, bordes de nube, etcétera) y no depurados con las máscaras previas, se optó por utilizar los compuestos máximos mensuales de estos índices.

Seguidamente, para dar consistencia a la serie de NDVI de máximos mensuales históricos, se realiza una interpolación lineal, con una ventana móvil de más/menos un mes, sobre los píxeles sin dato, debido a nubes, sombras, nieve o problemas radiométricos.

- **Cálculo de anomalías por pérdidas de actividad vegetativa**

Abarca el análisis de los datos de NDVI máximos mensuales para generar las condiciones de referencia, y la obtención de anomalías mensuales. A continuación, se detalla la secuencia de pasos para la generación de las anomalías:

- Cálculo de condiciones de referencia: A partir de la serie histórica de los NDVI máximos mensuales interpolados de los últimos seis años se generan las capas ráster de media y desviación estándar.



- **Cálculo de anomalías estandarizadas:** Se obtienen a partir de la comparación del NDVI máximo mensual del mes en curso, frente a sus condiciones de referencia (media y desviación estándar). La magnitud del cambio en la actividad vegetativa se mide por el número de desviaciones estándar que el dato en curso se desvía de su media histórica. Las anomalías estandarizadas se consideran significativas cuando se desvían, al menos, tres veces del promedio histórico.
- **Cálculo de anomalías absolutas:** Se construye a partir de la comparación del NDVI máximo mensual del mes en curso, frente a su media mensual. Este ráster permite filtrar los píxeles de las anomalías estandarizadas que no poseen cambios significativos.

En el caso de las pérdidas de vigor vegetal, se considera que una anomalía es significativa cuando su anomalía estandarizada es igual o menor a menos tres desviaciones estándar y su anomalía absoluta es inferior a un umbral fijado entre -0.15 y -0.25, adaptado en función de los valores medios del NDVI en la serie histórica.

- **Depuración de falsos positivos**

Las anomalías por pérdidas de actividad vegetativa son filtradas por:

- Índice de agua, MNDWI, eliminando aquellos píxeles afectados por bruma o neblinas (disminuyen drásticamente los valores de NDVI).
- Índice de incendio, minimizando los falsos positivos, asociados a suelos oscuros, suelos volcánicos, así como sombras de nubes y laderas de umbría.
- Capa de disponibilidad de datos, descartando aquellos píxeles con datos poco consistentes, debido al bajo número de observaciones existentes en la serie histórica (valores inferiores al 50%).
- **Cálculo de anomalías por incendios**

Generado a partir del cruce espacial de los píxeles con respuesta de incendio según BAIS2, con los agregados mensuales de los datos de EFFIS y FIRMS (Hotspots), del mes en curso. Asimismo, se genera el acumulado de incendios de los seis meses anteriores, con respecto al mes de estudio, minimizando la confusión de la superficie afectada por incendios con las anomalías asociadas a otras pérdidas de cobertura vegetal.

- **Construcción de las alertas mensuales**

La integración de las anomalías por pérdidas de actividad vegetativa, las anomalías por incendios y el Mapa Forestal de España (MFE), da lugar a las alertas mensuales. En consecuencia, las anomalías quedan categorizadas de la siguiente manera:

- Incendio mes en curso, superficie identificada como área quemada en el mes.
- Incendio meses anteriores (hasta 6 meses), superficies que muestran pérdidas significativas de actividad vegetativa como consecuencia de un incendio ocurrido con anterioridad, hasta un máximo de 6 meses (posteriormente quedarían identificadas como alertas por pérdidas de vigor vegetal).
- Pérdidas de vigor vegetal en formaciones arboladas (según el MFE), superficies identificadas como anomalías significativas por pérdidas de vegetación en formaciones de arbolado o de arbolado ralo del MFE.
- Pérdidas de vigor vegetal en formaciones desarboladas (según el MFE), ídem al anterior para formaciones de desarbolado según el MFE.

- Superficies estables, superficies sin anomalías significativas de NDVI o incendios.
- Sin dato de calidad, superficies sin disponibilidad de datos fiables en el mes en curso o en las condiciones de referencia.
- **Construcción de las alertas anuales**

Las alertas anuales proceden de la consolidación de las alertas mensuales, teniendo en cuenta el tipo de alerta (las alertas por incendio prevalecen sobre el resto) y su frecuencia de ocurrencia (frecuencia de la alerta por pérdida de vigor vegetal igual o mayor a tres meses consecutivos).

Las categorías de la capa de alertas anuales en la superficie forestal son:

- Alerta: Incendio, superficie afectada por el fuego en el transcurso del año.
- Alerta: Pérdida de vigor vegetal, superficies identificadas como alertas por pérdidas de actividad vegetativa en formaciones de arbolado y desarbolado del MFE.

Como información adicional, la capa de alertas anuales almacena para cada recinto el mes de inicio y fin de la alerta, así como el número de meses en los que ésta está activa.

- **Alertas anuales clasificadas sobre la superficie forestal**

Las alertas anuales clasificadas en la superficie forestal se generan de manera semiautomática anualmente, a año vencido, por geo procesamiento, a partir de las alertas anuales e información de referencia (MFE/FF y SIGPAC, principalmente), para todo el territorio nacional.

Éstas muestran el área susceptible de haber sufrido un cambio significativo en su cubierta vegetal por:

- Incendios o por pérdidas de actividad vegetativa en los estratos de forestal arbolado y desarbolado durante el año.
- Ganancias de actividad vegetativa. Engloba repoblaciones, forestaciones de terrenos agrícolas y evolución natural de la vegetación. Los cambios por ganancias de actividad vegetativa, al ser cambios graduales, se analizan para los recintos de pérdida de la Foto Fija anterior.

Para estos recintos se calcula la tendencia (Tau Kendall) del índice de vegetación, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), para el período histórico. Considerándose que se ha producido una recuperación de la cubierta vegetal cuando los valores de tendencia son positivos y significativos (p-value inferior a 5%).

En la Tabla 2 se resumen los criterios aplicados en la clasificación de las alertas anuales por pérdidas y de las ganancias para obtener las alertas anuales clasificadas en la superficie forestal a su máximo nivel de desagregación.

Tabla 2: Criterios aplicados en la clasificación de las alertas

Fuentes de información				
Alertas anuales	MFE-FF	SIGPAC	Clases finales alertas clasificadas	(N3_ALERTAS_TDT)
Alerta: Pérdida de vigor vegetal	Forestal arbolado (FA) y arbolado ralo (FAR)	Forestal (FO), pastizal (PS, PA, PR) y matorral (MT)	Alerta: Pérdida de vegetación de forestal arbolado	
Forestal arbolado (FA) y arbolado ralo (FAR)	Usos no forestales, ni pastizales, ni matorrales	Alerta: Conversión de forestal arbolado a no forestal		
Forestal desarbolado (FD)	Alerta: Conversión de forestal desarbolado a no forestal			
Alerta: Incendio	Forestal arbolado (FA) y arbolado ralo (FAR)	Alerta: Incendio de forestal arbolado		
Forestal desarbolado (FD)	Alerta: Incendio de forestal desarbolado			
Alerta: Ganancia de vigor vegetal	Recintos de cortas de forestal arbolado (FA y FAR) en la FF anterior	Alerta: Corta de forestal arbolado en recuperación		
Recintos de incendio de forestal arbolado (FA y FAR) en la FF anterior	Alerta: Incendio de forestal arbolado en recuperación			
Recintos de incendio de forestal desarbolado (FD) en la FF anterior	Alerta: Incendio de forestal desarbolado en recuperación			

Por tanto, las clases finales de la capa de alertas anuales clasificadas en la superficie forestal son:

- **Alerta: Pérdida de vegetación de forestal arbolado**, pérdidas de actividad vegetativa en superficies forestales arboladas (FA) o arboladas ralas (FAR) para aprovechamiento silvícola. Coinciden con usos SIGPAC de forestal, pastizal y matorral.
- **Alerta: Conversión de forestal a no forestal**, pérdidas de actividad vegetativa en superficies forestales (FA, FAR y FD) que según la información los usos de SIGPAC han pasado a ser agrícolas, artificiales o agua (no corresponden a usos de forestal, pastizal o matorral). Se discriminan dos categorías, en función de la formación forestal afectada: forestal arbolado (FA y FAR) y forestal desarbolado (FD).
- **Alerta: Incendio**, superficies afectadas por incendios, discriminando dos categorías en función de la formación forestal afectada: forestal arbolado (FA y FAR) y forestal desarbolado (FD).
- **Alerta: Ganancia de vegetación**, ganancia de actividad vegetativa en recintos forestales con pérdidas de actividad vegetativa, incendios y cortas, en la Foto Fija anterior.
- **Revisión de la capa de alertas anuales clasificadas**

El último paso en la generación de la capa de alertas anuales clasificadas es una revisión por fotointerpretación de una muestra de los recintos de alerta, con el fin de verificar la calidad de la capa resultante. La muestra de recintos se selecciona aleatoriamente sobre los recintos de alerta (pérdidas y ganancias) mayores a 1 hectárea. Tomando como referencia un tamaño de la muestra del 10%.

Como información de referencia se utilizan las imágenes Sentinel-2 (verano y otoño) de los dos años de comparación, año en curso y año anterior. Además, de las ortofotos PNOA de máxima actualidad y la ortofoto previa. Sobre estas imágenes se comprueba la evolución de la vegetación en los recintos de cambio de la muestra, comprobando que la precisión global a nivel provincial es igual o mayor al 80%. Si no se alcanzan estos valores se hace una revisión de la capa, depurando



manualmente las clases que puedan acumular las mayores imprecisiones, volviendo a revisar la nueva versión.

Medios utilizados en la generación de alertas:

La rutina de las alertas se ejecuta desde una máquina virtual en Google Cloud Platform. Todos los procesos concernientes al pre procesamiento de las escenas y generación de señales se han realizado desde la plataforma de Google Earth Engine (GORELICK et al., 2017), con la API de Python, en el entorno de desarrollo Vertex AI de Google Cloud Platform. Por su parte, los procesos de cálculos de condiciones de referencias, anomalías y alertas, se generan con el lenguaje R, desde el programa R Studio Server (Posit), el cual se despliega en un contenedor Docker. Finalmente, todas las señales y salidas asociadas a la rutina de las alertas, se almacenan en un bucket de Google Cloud Storage (alertas mensuales) y en una base de datos Postgre SQL (alertas anuales).

Las alertas anuales clasificadas se generan por geo-procesamiento a partir de cruces espaciales de las alertas anuales e información de referencia (MFE/FF y SIGPAC). Esta rutina se ejecuta desde una máquina virtual en Google Cloud Platform. Todos los procesos de cálculo de alertas anuales se generan con el lenguaje R desde el programa R Studio Server (Posit), el cual se despliega en un contenedor Docker.

La información de referencia (MFE/FF y SIGPAC) se procesa y prepara previamente en el software ArcGIS Pro de ESRI. Finalmente, todas las capas de alertas anuales clasificadas, se almacenan en una base de datos Postgre SQL.

Integración de los datos y servicios en el SIIB:

Para facilitar el acceso a los datos generados, se han desarrollado Servicios Web de Mapas con Geoserver que muestra las alertas generadas. Estos Servicios Web de Mapas que distribuyen la cartografía del Sistema EIKOS, permiten distintos tipos de llamadas (WMS, WFS, WMTS y WCS). Estos servicios son empleados dentro del Portal de Datos del IEPNB, siendo la fuente que alimenta los componentes cartográficos de dicho Portal y permitiendo mostrar la información actualizada en todo momento.

El nuevo visor del BDN, es el componente del Portal donde se han integrado todos servicios web de mapas creados, que permite consultar de manera sencilla los distintos Conjuntos de Datos Espaciales.

En las Figuras 4 y 5 se muestran dos ejemplos de lo que se puede visualizar en el visor con algunas capas cargadas del Sistema EIKOS:

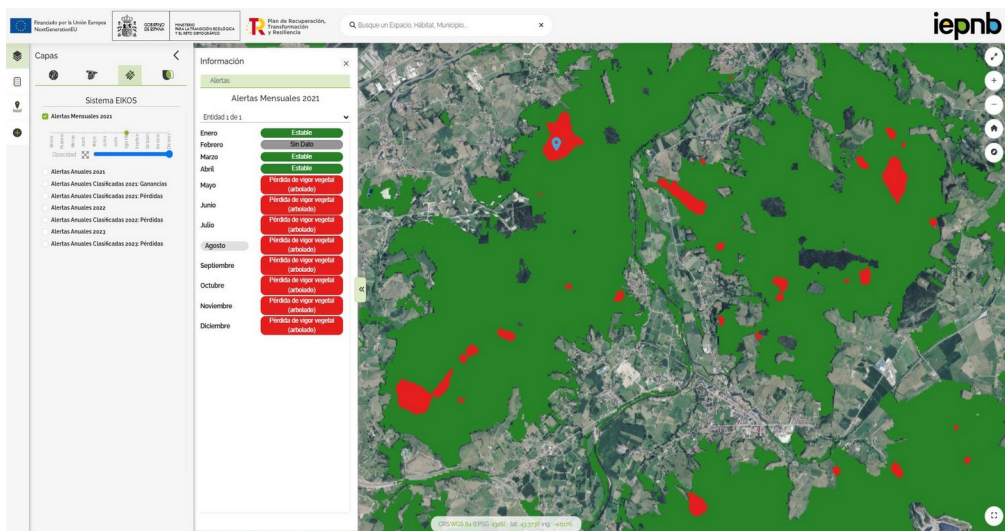


Figura 4. Detalle visor del BDN: Alertas mensuales

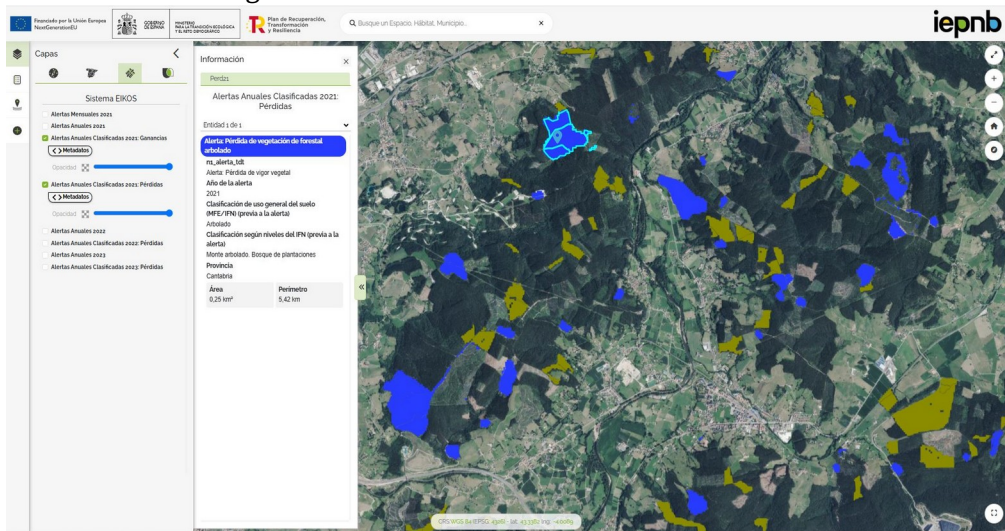


Figura 5. Detalle visor del BDN: Alertas anuales clasificadas (pérdidas y ganancias)

4. Resultado

Mediante imágenes del satélite Sentinel (programa Copernicus) y de distintas fuentes de información de referencia (principalmente IEPNB), EIKOS ha generado de manera semiautomática una capa de alertas mensuales, anuales y anuales clasificadas para la superficie forestal, proporcionando información sobre las teselas forestales del MFE, susceptibles de haber sufrido una pérdida significativa en la cubierta vegetal (pérdida de actividad vegetativa) respecto a unas condiciones de referencia.

En la Tabla 3 se muestran los productos generados en EIKOS y sus correspondientes categorías:

Tabla 3. Resumen de los productos de alertas generados en EIKOS

PRODUCTOS ALERTAS EIKOS	CATEGORIAS
Capa alertas mensuales	Incendio mes en curso
	Incendio meses anteriores
	Pérdida de vigor vegetal en formaciones arboladas

Pérdida de vigor vegetal en formaciones desarboladas	
Superficies estables	
Sin dato de calidad	
Capa de alertas anuales	Incendio
Pérdida de vigor vegetal	
Capa de alertas anuales clasificadas	Alerta por pérdida de vegetación de forestal arbolado
Alerta por Incendio de forestal arbolado	
Alerta por incendio de forestal desarbolado	
Alerta por conversión de forestal arbolado a no forestal	
Alerta por conversión de forestal desarbolado a no forestal	
Alerta por corta de forestal arbolado en recuperación	
Alerta por incendio de forestal arbolado en recuperación	
Alerta por incendio de forestal desarbolado en recuperación	

Las alertas anuales y anuales clasificadas de los años 2021, 2022 y 2023 se encuentran ya publicadas en el visor del IEPNB, mientras que las alertas mensuales solo están disponibles con acceso restringido.

5. Discusión

Las **alertas mensuales** en la superficie forestal constituyen un producto de alerta temprana, generado de manera automática que informan sobre los incendios y las pérdidas significativas de la actividad vegetativa, sin que sea posible atribuirles su causalidad (factores antrópicos, bióticos o abióticos). No incluyen ninguna revisión por fotointerpretación o comprobación en campo, por lo que deben ser tomados como un dato auxiliar a verificar con otras fuentes de información de referencia.

El uso del NDVI máximo mensual, aunque muy útil para minimizar los datos contaminados por brumas o neblinas (que pueden dar lugar a falsas alertas por pérdidas de actividad vegetativa), tiene como contrapartida que las alertas no se ven reflejadas en esta capa hasta el mes siguiente a la pérdida. En general, las alertas pueden mostrar infraestimaciones, especialmente en zonas con elevada cobertura nubosa (tercio norte peninsular, zonas de montaña o laurisilva en Canarias), debido a la menor disponibilidad de imágenes libres de nubes, o en zonas de montaña con persistencia de nieve. Las alertas por pérdidas de actividad vegetativa pueden estar sobredimensionadas en zonas afectadas por sequías o cambios en la dinámica estacional, especialmente en zonas de pastizales (pastizales y dehesas con baja Fracción de Cobertura Cubierta (FCC)) debido a su dinamismo y rápida respuesta a condiciones de ausencia o presencia de lluvias.

Las **alertas anuales clasificadas**, derivados de las alertas anuales y generado de manera semiautomática mediante el cruce espacial con el MFE/FF y el SIGPAC, alertan de los principales posibles cambios ocurridos en la superficie forestal y



constituyen el punto de partida para la elaboración de otras cartografías forestales, como la actualización anual del Mapa Forestal de España con base en Foto Fija. En líneas generales, las precisiones por pérdidas de vigor vegetal ligadas a las clases de incendios, pérdida de vegetación (cortas) y conversiones de forestal a no forestal son altas, superiores al 80%. En función del tipo de cubierta, las pérdidas de vigor vegetal mejor identificadas son las que afectan a superficies forestales arboladas y, en menor medida, de arbolado ralo. La clase que presenta mayores imprecisiones es la de desarbolado, fundamentalmente debido a su rápida recuperación en algunas zonas (por ejemplo, pastizales del norte peninsular). En las pérdidas de vigor vegetal, las principales comisiones (falsos cambios) se deben a la presencia de elevada cobertura nubosa en zonas de montaña y a sequías en pastizales y dehesas, especialmente. La clase de pérdida de vegetación incluye cortas, aclareos de distintas intensidades y desbroces que, en ocasiones, solo eliminan el sotobosque de las plantaciones.

Las omisiones (cambios no detectados) no se han evaluado, al no disponer de datos de verdad terreno sobre posibles pérdidas, ni realizarse una revisión exhaustiva del resto de la superficie forestal en la que no se han detectado cambios. Tampoco se ha evaluado la geometría del recinto (delimitación del polígono) ya que ésta puede ser muy variable y dependiente de la fecha de referencia de la imagen utilizada en la revisión, de la cubierta vegetal afectada (arbolado, matorral o pastizal), su capacidad de regeneración, severidad del cambio, etcétera.

En cuanto a las alertas por ganancia, su cálculo se circunscribe exclusivamente a los recintos de pérdidas de vigor vegetal en la Foto Fija anterior y muestran los recintos que presentan un incremento sostenido de su actividad vegetativa en el periodo histórico. Las ganancias, en general, presentan precisiones más bajas, debido especialmente a la elevada dinámica de las cubiertas herbáceas, correspondientes a los primeros estadios de recuperación, o al pequeño porte de los plantones en las reforestaciones, donde sigue predominando la respuesta de suelo frente al de la vegetación, a la resolución espacial de Sentinel-2.

6. Conclusiones

La creación de un Sistema de Información Territorial (EIKOS) está permitiendo una continua monitorización y seguimiento de los cambios acontecidos en el territorio, mediante la utilización de las tecnologías de observación y procesamiento masivo de datos para poder cumplir con las obligaciones de información a las que tiene que dar respuesta la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación de MITECO. En su primera fase de desarrollo se ha profundizado en la monitorización de los ecosistemas forestales.

Las alertas anuales clasificadas, derivadas de las alertas anuales y generadas de manera semiautomática mediante el cruce espacial con el MFE/FF y el SIGPAC, alertan de los principales posibles cambios ocurridos en la superficie forestal y constituyen el punto de partida para la elaboración de otras cartografías forestales, como la actualización anual del Mapa Forestal de España con base en Foto Fija.

Tras la puesta en marcha de EIKOS, en el que se ha conseguido implementar un sistema de seguimiento de ecosistemas forestales a nivel nacional, es necesario continuar con el camino iniciado y abordar nuevos retos en el monitoreo y seguimiento del resto de ecosistemas (agrícola, urbano, humedales, etc.), implementando avances tecnológicos que permitan avanzar en la generación de procesos, productos y servicios en el seguimiento de los distintos tipos de



ecosistemas.

7. Agradecimientos

EIKOS ha sido financiado con fondos procedentes del Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (PRTR) de la Unión Europea-NextGenerationEU y ha contado con el apoyo de la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación (MITECO).

Este proyecto cuenta con la colaboración y las recomendaciones técnicas de los miembros de la Mesa de Asesoramiento Científico Técnico de EIKOS

8. Bibliografía

- BERTON, A.; GROSSI, G.; BERTINI, R.; BERNARDINI, A.; NISINI, L.; GIANNETTI, F.; CECCATO, P.; 2019. Exploitation of Sentinel-2 Time Series to Map Burned Areas at the National Level: A Case Study on the 2017 Italy Wildfires. *Remote Sens.* 11(6): 622.
- CABELLO, J.; ALCARAZ-SEGURA, D.; LOURENÇO, P.; 2012. Funcionamiento de los ecosistemas de la Red de Parques Nacionales de España: detección de impactos recientes y desarrollo de un sistema de seguimiento y alerta a partir de herramientas de teledetección. *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2008-2011*, págs.45-69, ISBN 978-84-8014-834-4
- EARTH ENGINE.; 2024. Data Catalog Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED
- EASTMAN, R.; 2024. *TerrSet LiberaGis Geospatial Monitoring and Modeling System – Tutorial*. Clark Labs, Clark University. 371 pp. Worcester, MA.
- FILIPPONI, F.; 2018. BAIS2: Burned Area Index for Sentinel-2. *Proceedings 2*, no. 7: 364. <https://www.mdpi.com/2504-3900/2/7/364>.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R.; 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D.; DEERING, W.; 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, ERTS Third Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.
- SINERGISE; 2019. Forest Cut Temporal Detection (Sentinel Hub Custom Script Contest). Sentinel Hub Scripts. Disponible en: https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/forest_cut_temporal_detection/
- XU, H.; 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3025-3033.