

González, I.; Guillén-Climent, M.; Bravo-Núñez, A.; Esteban, J.; Tomé, J. Armonización multifuente de perturbaciones forestales: de productos existentes a una cartografía robusta

Armonización multifuente de perturbaciones forestales: de productos existentes a una cartografía robusta

González, Isabel¹ **Guillén-Climent, Mariluz**¹ **Bravo-Núñez, Andrés**^{1,2} **Esteban, Jessica**¹ **Tomé, José Luis**¹

¹ Agresta S.Coop, España

² Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universidad Politécnica de Valencia

ORCID: González 0009-0002-1455-9174 Guillén-Climent 0009-0000-3865-4681 Bravo-Núñez 0009-0003-6650-3487 Esteban 0000-0001-8350-5343 Tomé 0000-0003-2298-9115

Correspondencia: igonzalez@agresta.org mguillen@agresta.org abravo@agresta.org jesteban@agresta.org jltome@agresta.org

RESUMEN

La monitorización de perturbaciones en bosques mediterráneos cuenta con numerosos productos de detección de cambio (globales, europeos y nacionales). Sin embargo, la heterogeneidad en sensores, resolución espacial, cobertura temporal y leyendas dificulta su integración y explotación conjunta. En el marco del proyecto RIGOR-MED, cuyo objetivo es mejorar la representatividad y rigor estadístico de las observaciones, este trabajo evalúa una armonización multifuente integrando productos internos basados en Landsat y Sentinel-2 (CCDC) con Global Forest Change (GFC), European Forest Disturbance Atlas (EFDA) y el Sistema de Alertas y Cambios Anuales (EIKOS). La armonización se fundamenta en (i) una leyenda común y reglas de cross-walking y (ii) fusión espacio-temporal. A partir de esta integración se generan mapas armonizados para la Península Ibérica y Baleares, aplicando dos estrategias alternativas de resolución de conflictos: prioridad por fuente y prioridad por clase. La validación con datos fotointerpretados, demuestra que la armonización mejora la consistencia y fiabilidad respecto a los productos individuales. Los mapas armonizados alcanzan una exactitud binaria del 99%, eliminan el error de comisión y reducen la omisión a valores inferiores al 32% (17% bajo una definición restrictiva de perturbación). En la validación temática, el enfoque mejora la detección de aprovechamientos manteniendo alta precisión y consigue sensibilidad completa para incendios, aunque con retos persistentes en la identificación de perturbaciones sutiles. En conjunto, los resultados respaldan que la integración multifuente constituye una vía eficaz para generar productos operacionales robustos de monitorización de perturbaciones.

Palabras clave: *perturbaciones forestales; armonización; fusión espacio-temporal; validación;*

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026


Armonización multifuente de perturbaciones forestales: de productos existentes a una cartografía robusta

González, Isabel ⁽¹⁾, Guillén-Climent, Mariluz ⁽¹⁾, Bravo-Núñez, Andrés ^(1,2), Esteban, Jessica ⁽¹⁾, Tomé, José Luis ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Agresta S.Coop, España.

 0009-0002-1455-9174, igonzalez@agresta.org ;  0009-0000-3865-4681, mguillen@agresta.org.
 0000-0001-8350-5343, jesteban@agresta.org ;  0000-0003-2298-9115, jltome@agresta.org.

⁽²⁾ Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universidad Politécnica de Valencia.

 0009-0003-6650-3487, abravo@agresta.org.

Resumen: La monitorización de perturbaciones en bosques mediterráneos cuenta con numerosos productos de detección de cambio (globales, europeos y nacionales). Sin embargo, la heterogeneidad en sensores, resolución espacial, cobertura temporal y leyendas dificulta su integración y explotación conjunta. En el marco del proyecto **RIGOR-MED**, cuyo objetivo es mejorar la representatividad y rigor estadístico de las observaciones, este trabajo evalúa una **armonización** multifuente integrando productos internos basados en Landsat y Sentinel-2 (CCDC) con **Global Forest Change (GFC)**, **European Forest Disturbance Atlas (EFDA)** y el **Sistema de Alertas y Cambios Anuales (EIKOS)**. La armonización se fundamenta en (i) una leyenda común y reglas de **cross-walking** y (ii) **fusión espacio-temporal**. A partir de esta integración se generan mapas armonizados para la Península Ibérica y Baleares, aplicando dos estrategias alternativas de resolución de conflictos: prioridad por fuente y prioridad por clase. La validación con datos fotointerpretados, demuestra que **la armonización mejora la consistencia y fiabilidad respecto a los productos individuales**. Los mapas armonizados alcanzan una exactitud binaria del 99%, eliminan el error de comisión y reducen la omisión a valores inferiores al 32% (17% bajo una definición restrictiva de perturbación). En la validación temática, el enfoque mejora la detección de aprovechamientos manteniendo alta precisión y consigue sensibilidad completa para incendios, aunque con retos persistentes en la identificación de perturbaciones sutiles. En conjunto, los resultados respaldan que la integración multifuente constituye una vía eficaz para generar productos operacionales robustos de monitorización de perturbaciones.

Palabras clave: perturbaciones forestales; armonización; fusión espacio-temporal; validación;

Multi-source harmonization of forest disturbances: from existing products to robust mapping

Abstract: *Monitoring disturbances in Mediterranean forests relies on numerous change detection products (global, European, and national). However, differences in sensors, spatial resolution, temporal coverage, and classification legends make their integration and joint use challenging. Within the framework of the RIGOR-MED project, which aims to improve the representativeness and statistical rigor of observations, this study evaluates a multi-source harmonization approach that integrates in-house products based on Landsat and Sentinel-2 (CCDC) with Global Forest Change (GFC), the European Forest Disturbance Atlas (EFDA), and the Annual Alerts and Changes System (EIKOS). The harmonization is based on (i) a common legend and cross-walking rules, and (ii) spatiotemporal fusion. From this integration, harmonized maps are produced for the Iberian Peninsula and the Balearic Islands, applying two alternative conflict-resolution strategies: source-priority and class-priority. Validation against photo-interpreted reference data shows that harmonization improves consistency and reliability compared with the individual products. The harmonized maps achieve 99% binary accuracy, eliminate commission error, and reduce omission to values below 32% (17% under a restrictive definition of disturbance). In the thematic validation, the approach improves the detection of timber harvesting while maintaining high precision, and achieves full sensitivity for wildfires, although persistent challenges remain in identifying subtle disturbances. Overall, the results support multi-source integration as an effective pathway for generating robust operational products for disturbance monitoring.*

Keywords: forest disturbances; harmonization; spatio-temporal fusion; validation

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques mediterráneos están cada vez más expuestos a perturbaciones naturales y antrópicas, lo que incrementa la necesidad de sistemas de monitorización consistentes que apoyen la gestión y la toma de decisiones y políticas públicas.

En este contexto, la teledetección proporciona un acceso sin precedentes a información multiescalar, reforzado por la creciente disponibilidad de productos de perturbaciones, actualizados de forma recurrente y con cobertura de escala regional a global (Stahl *et al.*, 2023). Sin embargo, dichos productos proceden de distintos sensores, con resoluciones, periodos temporales y metodologías de detección/clasificaciones diferentes, lo que dificulta su integración y su uso operacional. Además, su validación no siempre es consistente, trazable ni rigurosa, lo que genera incertidumbre al interpretar discrepancias y medir cambios reproducibles.

El proyecto RIGOR-MED (*Remotely-sensed and Statistically Rigorous Monitoring of Disturbances in Mediterranean Forests*) busca mejorar la representación de perturbaciones en bosques mediterráneos combinando múltiples fuentes de información. Este trabajo tiene como objetivo cuantificar los beneficios de armonizar productos existentes frente a utilizarlos por separado.

2. MATERIAL

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolla en la Península Ibérica y Baleares. Para restringir el análisis a áreas forestales se aplicó una máscara, binaria bosque no bosque, basada en el producto Copernicus Forest Type 2018 (10 m), alineada con la definición FAO, con unidad mínima mapeable de 0,5 ha y umbral de cobertura arbórea del 10%.

2.2. Productos de perturbaciones forestales

Para construir la cartografía armonizada de perturbaciones se integraron productos ampliamente utilizados, con alcances y niveles de detalle complementarios. Se emplearon:

- **Global Forest Change (GFC)** (Hansen *et al.*, 2013), proporciona estimaciones anuales globales de pérdida de cobertura arbórea a 30 m desde el año 2000; es un producto consistente y actualizado, aunque no incluye la causa de la perturbación.
- **European Forest Disturbance Atlas (EFDA)** (Viana-Soto and Senf, 2024), con mapas anuales paneuropeos de perturbaciones para 1983–2023 a 30 m, que diferencia tipos de cambio específicos.
- **Sistema de Alertas y Cambios Anuales (EIKOS)**, un producto nacional vectorial para España (2020–2023) con detección casi en tiempo real y una leyenda centrada en pérdida de vegetación e incendios.

- Estos productos se complementan con cartografías anuales generadas en el marco de **RIGOR-MED** mediante el algoritmo Continuous Change Detection and Classification (CCDC) (Zhu & Woodcock, 2014): (i) cartografía basada en Landsat (30m) (2018–2023) y (ii) cartografía basada en Sentinel-2 (20m) (2020–2023). Ambas fuentes clasificadas en cuatro tipos de perturbación.

3. METODOLOGÍA

3.1. Armonización

Para integrar productos de perturbaciones con leyendas, resoluciones y coberturas temporales distintas, se aplicó un flujo operativo basado en: (i) homogenización espacial y temporal, (ii) armonización temática (cross-walking) y (iii) fusión espacio-temporal a nivel píxel, generando dos mapas armonizados alternativos.

Antes de la integración, todos los productos se re proyectaron a EPSG:4326, se remuestrearon a 30 m, se aplicó la máscara forestal y se armonizó el marco temporal a una escala anual común (2020–2023) para todas las fuentes integradas.

Ontología común o cross-walking; permitió alinear las leyendas originales a una ontología común mediante tablas de correspondencia (Tabla 1), asegurando la coherencia entre fuentes (Soulard *et al.*, 2017). La leyenda unificada consta de siete clases: sin dato (0), sin cambio (1), corta a hecho (2), clara (3), desbroce (4), incendio (5) y desconocido (6). En este esquema, la clase 'clara' integra eventos de reducción de cobertura de copa.

Tabla 1. Reglas de armonización. Leyendas original y común

Fuente	Clase original	Clase armonizada
CCDC (Landsat y Sentinel-2)	Sin dato	Sin dato
	Sin cambio	Sin cambio
	Corta a hecho	Corta a hecho
	Clara	Clara
	Desbroce	Desbroce
GFC	Incendio forestal	Incendio forestal
	Pérdida de cobertura arbórea	Desconocido
EFDA	Sin cambio	Sin Cambio
	Viento	Desconocido
	Aprovechamiento Incendio forestal	Corta a hecho/Clara Incendio forestal
EIKOS	Incendio forestal	Incendio forestal
	Pérdida de vegetación	Desconocido

Los 'aprovechamientos' de EFDA se desagregaron en 'corta a hecho' o 'clara' mediante un modelo bayesiano que empleó distribuciones beta ajustadas con áreas de coincidencia EFDA-Landsat. La clase final se determinó por la mayor probabilidad *a posteriori*, aplicando parámetros predefinidos en casos de baja representatividad (< 10 píxeles por clase).

La **fusión espacio-temporal** a nivel de píxel se basó en una convergencia de evidencias: un píxel se etiqueta

como cambio solo si al menos dos fuentes lo detectan en una ventana de ± 1 año. Esta regla reduce errores de comisión al integrar productos con distinta frecuencia de actualización (Soulard *et al.*, 2017; Reiche *et al.*, 2024). Los incendios de EIKOS se trataron como excepción, con prioridad absoluta. Los conflictos entre clases se resolvieron mediante dos estrategias:

- **Estrategia A (Prioridad por fuente):** Sistema de votación jerárquico basado la riqueza temática de los productos y la fiabilidad contrastada (EFDA > Landsat > EIKOS > Sentinel > GFC). En caso de empate en votos, prevalece la etiqueta de la fuente con mayor prioridad.
- **Estrategia B (Prioridad por clase):** Resolución de conflictos mediante una jerarquía temática establecida (Incendio > Corta a hecho > Clara > Desbroce). Ante empates, se impone la clase con mayor rango temático.

Ambas capas fueron evaluadas mediante validación independiente frente a los productos individuales bajo distintas definiciones de "cambio".

3.2. Validación

La validación utiliza una base de datos de referencia basada en fotointerpretación sistemática en Collect Earth Online (CEO) con imágenes Landsat, Sentinel-2 y PlanetScope. Se trata de una base de datos que consta de 2.796 unidades muestrales (250 x 250 m) y 3.453 polígonos de perturbación en 13 países europeos. En cada unidad se asignó una etiqueta binaria (cambio/no cambio) y, ante evidencias de alteración, se delimitaron los polígonos registrando el año y tipo de evento. Para el ámbito de España, se analizaron 650 unidades, de las cuales 294 se identificaron como perturbación: 135 cortas a hecho, 94 claras, 52 desbroces y 13 incendios.

Se construyeron matrices de confusión a nivel de polígono comparando la referencia con la clase mayoritaria de cada mapa para estimar la exactitud global (OA) y los errores de omisión (OE) y comisión (CE). La evaluación constó de: 1) una **validación binaria** bajo dos definiciones de cambio: **específica** (según la leyenda de cada producto) y **restrictiva** (solo cortas a hecho e incendios), y 2) una **validación temática** para evaluar la capacidad de discriminación del tipo de perturbación (sin cambio, aprovechamiento forestal (corta y clara) e incendio).

4. RESULTADOS

4.1. Validación binaria (Cambio / No Cambio)

Definición específica por producto

Según los resultados de la Tabla 2, los productos armonizados (Estrategias A y B) mostraron un rendimiento superior y consistente (OA = 96,75%), destacando por su comisión nula (0%) y una omisión moderada (32,08%). Este comportamiento se debe al criterio de acuerdo mínimo, que actúa como un filtro para falsos positivos.

En comparación, algunos productos presentan un comportamiento más "conservador" (p. ej., Landsat: CE = 0% pero OE = 45,28%; GFC: CE = 0% y OE = 35,71%),

mientras que otros incrementan la comisión (Sentinel-2: CE = 15%; EFDA: CE = 4,55%; EIKOS: CE = 23,08%), lo que sugiere desajustes temáticos o una definición más amplia de perturbación respecto a la referencia en esta configuración.

Tabla 2. Validación. Definición específica por producto

Fuente	OA %	OE % (cambio)	CE % (cambio)
Landsat	95,41	45,28	0,00
Sentinel-2	95,22	35,85	15,00
GFC	97,99	35,71	0,00
EFDA	94,96	54,35	4,55
EIKOS	97,19	28,57	23,08
Arm, (prio, fuente)	96,75	32,08	0,00
Arm, (prio, clase)	96,75	32,08	0,00

Definición restrictiva (cambios abruptos: cortas a hecho e incendios)

En este escenario, los mapas armonizados alcanzan el rendimiento óptimo con una exactitud global del 99%, reduciendo la omisión al 17,86% y manteniendo la comisión nula. La mejora en la detección radica en que los cambios abruptos generan una ruptura espectral más nítida que los eventos sutiles, y por tanto son más fácilmente detectables.

Tabla 3. Validación. Definición restrictiva (cortas e incendios)

Fuente	OA %	OE % (cambio)	CE % (cambio)
Landsat	98,19	32,14	0,00
Sentinel-2	96,99	32,14	24,00
GFC	97,99	35,71	0,00
EFDA	97,19	46,43	6,25
EIKOS	97,19	28,57	23,08
Arm, (prio, fuente)	99,00	17,86	0,00
Arm, (prio, clase)	99,00	17,86	0,00

En comparación, Landsat y GFC mantienen un perfil conservador (CE = 0%), pero con omisiones más altas (OE = 32,14% y 35,71%, respectivamente), mientras que Sentinel-2 y EIKOS presentan comisiones elevadas (CE = 24,00% y 23,08%), lo que sugiere que siguen detectando eventos que quedan fuera de esta definición restrictiva. La omisión de EFDA mejora ligeramente (hasta el 46,43%) mientras que la comisión desciende al 6,25%, lo que indica una mejora ligera bajo un marco de cambios más simple.

4.2. Exactitud temática (tipo de perturbación)

Tal como se puede ver en la tabla 4, en aprovechamiento, los productos armonizados fueron más consistentes al lograr la menor omisión (32,5-35%) y una comisión nula, superando a Sentinel-2 (OE = 37,5%; CE = 7,4%), Landsat (CE = 0%; OE = 47,5%), y EFDA (CE = 13,3%, OE = 67,5%). En la categoría incendio, la armonización no presentan error de omisión (OE = 0%). La omisión nula en incendios se debe a su prioridad en las reglas de fusión, lo que asegura su detección a costa de mayores falsos positivos,

probablemente por desajustes perimetales.

Tabla 5. Resultados validación temática

Producto	Sin cambio	Aprovechamiento	Incendios
Landsat	OE 0,0	OE 47,5	OE 16,7
	CE 3,9	CE 0,0	CE 16,7
Sentinel-2	OE 0,4	OE 37,5	OE 16,7
	CE 3,3	CE 7,4	CE 0,0
EFDA	OE 0,2	OE 67,5	OE 66,7
	CE 5,1	CE 13,3	CE 71,4
Arm. (prio. fuente)	OE 0,0	OE 35,2	OE 0,0
	CE 2,5	CE 0,0	CE 25,0
Arm. (prio. clase)	OE 0,0	OE 32,5	OE 0,0
	CE 2,3	CE 0,0	CE 25,0

5. CONCLUSIONES

Los resultados respaldan la armonización como estrategia para explotar productos existentes y producir cartografías más consistentes y operativas para la monitorización forestal. Los productos armonizados presentan un equilibrio favorable entre omisión y comisión en todas las configuraciones de validación. Destacan las exactitudes obtenidas para los cambios abruptos (exactitud global cercana al 99%), que son más fácilmente detectables al presentar rupturas espectro-temporales más marcadas (Esteban *et al.*, 2021, Giambelluca *et al.*, 2025). Bajo la definición restrictiva (cortas a hecho e incendios), los mapas armonizados alcanzan un error de comisión nulo y una reducción clara de la omisión frente a varios productos individuales. Esta comisión nula es coherente con el enfoque conservador de coincidencia de al menos dos fuentes, que filtra detecciones aisladas y reduce falsos positivos.

Al ampliar la definición de cambio para incluir perturbaciones más sutiles, aumenta la omisión en los productos armonizados (del 17,86% al 32,08%), en línea con la naturaleza gradual y espacialmente fragmentada de estos procesos (Esteban *et al.*, 2021, Giambelluca *et al.*, 2025). Aunque la armonización no elimina esta dificultad intrínseca, mejora la exactitud respecto al uso de productos individuales.

En la validación temática, la armonización mejora la detección de aprovechamientos, al mantener una precisión elevada y reducir la omisión respecto a las fuentes individuales. En el caso de incendios, se obtiene omisión nula (OE=0%) a costa de una comisión apreciable ($\approx 25\%$), coherente con desajustes temporales y/o espaciales entre productos y datos de referencia (fecha y delimitación del perímetro).

Finalmente, las dos estrategias de resolución de conflictos (prioridad por fuente frente a prioridad por clase) producen resultados prácticamente equivalentes, lo que indica que el criterio de acuerdo mínimo ya resuelve la mayor parte de discrepancias y que los conflictos restantes tienen un impacto limitado en el periodo analizado.

6. AGRADECIMIENTOS

El proyecto ha sido financiado en virtud del acuerdo de subvención n.º 101084481-FORWARDS-HORIZON-CL6-2022-CLIMATE-01 entre el EFI y la Agencia Ejecutiva de Investigación (REA) ('la autoridad otorgante'), en virtud de los poderes delegados por la Comisión Europea. La participación de Andrés Bravo-Núñez ha sido financiada por la ayuda DIN2024-013483 otorgada por el MCIN/AEI / 10.13039/501100011033.

7. REFERENCIAS

- Esteban, J., Fernández-Landa, A., Tomé, J. L., Gómez, C., & Marchamalo, M. (2021). Identification of Silvicultural Practices in Mediterranean Forests Integrating Landsat Time Series and a Single Coverage of ALS Data. *Remote Sensing*, 13(18), 3611. <https://doi.org/10.3390/rs13183611>.
- Giambelluca, A. L., Hermosilla, T., Álvarez-Mozos, J., & González-Audicana, M. (2025). Identifying forest harvesting practices: Clear-cutting and thinning in diverse tree species using dense Landsat time series. *Forest Ecology and Management*, 578, 122442.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., ... & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853.
- Reiche, J., Balling, J., Slagter, B., & Carter, S. (2024). Integrating satellite-based forest disturbance alerts improves detection timeliness and confidence. *Environmental Research Letters*, 19(5), 054011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad2d82>
- Sistema de Alertas Mensuales y Anuales sobre la Superficie Forestal (MAAFS). (2024). EIKOS, Sistema de Seguimiento Territorial de los Ecosistemas. Subsistema de Información Territorial.
- Soulard, C. E., Wilson, T. S., & Sleeter, B. M. (2017). Harmonization of forest disturbance datasets of the conterminous USA from 1986 to 2011. *Environ Monit Asses*, 189:17. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5879-5>
- Stahl, A.T., Andrus, R., Hicke, J.A., Hudak, A.T., Bright, B.C., Meddens, A.J.H. (2023). Automated attribution of forest disturbance types from remote sensing data: A synthesis. *Remote Sensing of Environment* 285, 113416. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113416>
- Viana-Soto, A., & Senf, C. (2024). The European Forest Disturbance Atlas: A Forest Disturbance Monitoring System Using the Landsat Archive. Published as an open-access preprint in *Earth System Science Data Discussions* (DOI: 10.5194/essd-2024-361).
- Zhu, Z., Woodcock, C.E., 2014. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 144, 152–171. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>