



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Análisis por teledetección de la severidad del fuego en la vegetación.

GARCÍA FERNÁNDEZ, M.A.¹, CAÑIZARES CARDÓS, M.¹, SOBRINO RODRÍGUEZ, J.A.², LLORENS COMPANY, R.², CARRILLO PATIÑO, A.³ y ROLDÁN ZAMARRÓN, A.³

¹ Departamento de Teledetección, G. Sist. Inf. Geográfica Tragsatec - Grupo Tragsa - SEPI.

² Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI) de la Universidad de Valencia.

³ Subdirección de Innovación y Desarrollo de Servicios - Grupo Tragsa - SEPI.

Resumen

Dentro del proyecto “Estrategia conjunta para la Protección y Restauración de los ecosistemas afectados por Incendios forestales” (EPyRIS), financiado por el Programa Interreg Sudoe y cuyo consorcio internacional está formado por diversas instituciones de España, Portugal y Francia, se está desarrollando una metodología de análisis de la severidad causada por los incendios en la vegetación, aplicando técnicas de Teledetección a las imágenes capturadas por los satélites Sentinel-2 del programa Copernicus de la ESA.

La metodología desarrollada permite disponer de un perímetro preciso del incendio y extraer las islas interiores no afectadas por el fuego mediante un nuevo algoritmo obtenido a partir de la combinación de 3 índices (dBAI, dBAIM y dBAIS2), así como obtener, en función del tipo de vegetación afectada, los grados de severidad producidos por el fuego (índices dNBR y BAI post). Se ha probado en distintos incendios ocurridos durante los veranos de 2019 y 2020, empleando datos de campo para su validación. Mediante su implementación en una plataforma GIS, se persigue que esta cartografía rápida y precisa resulte un instrumento eficaz de ayuda para los gestores forestales en la realización de un diagnóstico temprano de los daños tras el incendio.

Palabras clave

Teledetección, Sentinel, ESA, GIS, Copernicus, Incendios, Severidad, EPyRIS, NDVI, dNBR, BAI.

1. Introducción

Los incendios forestales, junto con el cambio climático y la sequía, se consideran una de las principales perturbaciones que causan, entre otros impactos, la destrucción de la vegetación en la Península Ibérica (Sousa, 1984). El cambio climático supone un gran desafío para los bosques, en particular para las zonas mediterráneas, en las que se prevé que aumente la probabilidad de que se produzcan fenómenos extremos (Linder et al., 2010). En los últimos años, el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones han dado lugar a un aumento del peligro de incendios (Vilar et al., 2016) y, por lo tanto, una mayor emisión de gases (CO₂, CH y CH₄) relacionados con el efecto invernadero (Seiler & Cruzen, 1980; Bergamaschi et al., 2000). Como resultado del alto nivel de gravedad alcanzado en algunos incendios, la vida humana, las infraestructuras y los servicios de los ecosistemas se han puesto en peligro (Vega et al., 2013). Sin embargo, hay casos en los que los incendios forestales ayudan al ecosistema, como pueden ser la quema de rastrojos para fertilizar el suelo y eliminar las malas hierbas antes de la siembra (Vélez et al., 1990).

En la actualidad, los datos de satélite desempeñan un papel importante en el apoyo al conocimiento sobre la severidad de los incendios, ya que proporcionan información que permite cartografiar las zonas dañadas por el fuego de forma rápida y precisa, lo cual es fundamental para apoyar el control de los incendios, evaluar las pérdidas ambientales, definir estrategias de planificación y supervisar la restauración de la vegetación (Filipponi, 2019). Las herramientas de Teledetección han demostrado ser útiles para estimar con precisión las zonas afectadas por el fuego

y su severidad, para ayudar en la prevención, evaluación y vigilancia de los incendios forestales a escala global, regional y local (Chuvieco, 2009).

En este sentido, el instrumento multiespectral (MSI) a bordo de la constelación de satélites Sentinel-2 ofrece la posibilidad de obtener información en una resolución espacial media y alta (10-20m) (Van der Meer et al, 2014; ESA, 2015; Van der Werff & Van der Meer, 2015). Además, el sensor MSI proporciona información espectral en varias bandas, siendo el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR) las regiones en las que existe una mayor diferencia entre la zona quemada y no quemada (Fernández-Manso et al., 2016; Escuin et al., 2008). Estudios recientes, utilizando los índices espectrales Sentinel-2, muestran una alta correlación con las zonas quemadas y los niveles de severidad medidos en trabajos de campo (Fernández-Manso et al., 2016; Lutes et al., 2006; Mallinis et al., 2018 & Huang et al., 2016).

Se han desarrollado varios métodos para cartografiar las zonas afectadas por el fuego a partir de datos de satélite, utilizando series multitemporales o una única imagen post-incendio (Boschetti et al., 2010). La clasificación basada en el umbral de diferencia del índice dNBR "*Difference Normalized Burn Ratio*" (Key & Benson, 2005) se ha convertido en una referencia metodológica para obtener mapas de severidad (Soverel et al., 2010). No obstante, no existe un acuerdo sobre qué índice funciona mejor en la detección de áreas afectadas por el fuego y en la estimación de la severidad de los incendios y sobre qué condiciones deben utilizarse (Lasaponara, 2006).

En los últimos años se han desarrollado servicios operacionales basados en las referencias metodológicas para la cartografía de zonas quemadas con el fin de proporcionar información casi en tiempo real sobre los incendios forestales. Además de la detección del área quemada y niveles de severidad con Sentinel-2, el programa Copernicus de la ESA es la principal fuente de información sobre incendios forestales de Europa (Llorens et al., 2020). Por una parte, el Servicio Europeo de Información sobre Incendios Forestales (EFFIS), que es una base de datos del sistema de cartografía meteorológica y con satélite desarrollada por el JRC (*Joint Research Centre*), principalmente sirve de apoyo a los servicios encargados de la protección de los bosques contra los incendios en los países de la Unión Europea con una información actualizada y fiable en tiempo casi real y con una resolución media-baja partiendo de datos de satélite ópticos y térmicos. Por otra, el Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (EMS) que, bajo demanda, entrega mapas con resolución espacial alta de incendios forestales generados a partir de datos de satélite, principalmente para determinar su perímetro y la distribución de la severidad diferenciada en cuatro niveles (Navarro et al., 2017; EMSR213, 2018).

En base a todo ello y dentro del proyecto "Estrategia conjunta para la Protección y Restauración de los ecosistemas afectados por Incendios forestales" (EPyRIS - SOE2/P5/E0811), financiado por el Programa Interreg Sudoe, coordinado por el Grupo Tragsa y cuyo consorcio internacional está formado por diversas instituciones de España (Universidad de Valencia, CIF-Lourizán, Universidad de Santiago de Compostela) Portugal (Universidad de Aveiro) y Francia (Office National des Forêts - ONF), se ha desarrollado una metodología para la detección automática mediante imágenes de satélite Sentinel-2 de los diferentes grados de la severidad causada por el fuego a la vegetación, cuyo objetivo es facilitar información rápida y precisa a los gestores del territorio para la definición de las áreas prioritarias de intervención post incendio. Para validar los resultados de las zonas quemadas se utilizan como referencia mapas del MITERD (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), ICNF (*Instituto para a Conservação da Natureza e das Florestas*) y EMS (*Emergency Mapping Service*). Los datos de referencia en las zonas de incendio se basan en mediciones GPS, cartografía regional de la zona y datos obtenidos por teledetección. En cuanto a los niveles de severidad, se utilizan datos EFFIS basados en el algoritmo dNBR utilizando el sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*).

2. Objetivos

El objetivo principal ha sido definir una metodología para laimetrización de los incendios y el análisis de la severidad de los daños causados en la vegetación, que permita disponer de una cartografía de severidad rápida y fiable que pueda integrarse en una herramienta de trabajo sencilla y versátil.

3. Metodología

Para la obtención de los índices utilizado se han utilizado imágenes Sentinel 2 en nivel 2A (corregidas atmosféricamente) que pueden ser descargadas directamente desde el Sci-Hub de la ESA (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). De este modo, se selecciona una imagen con fecha pre-incendio y otra con fecha post-incendio, siempre teniendo en cuenta las fechas oficiales de ocurrencia y extinción en los incendios a analizar. Para seleccionar las imágenes libres de nubes se hace uso de la máscara que lleva asociada el producto, por sus siglas en inglés SCL (*Scene Classification Land*), con una resolución espacial de 20m y que clasifica las diferentes categorías incluidas en la Figura 1 (Vuolo et al., 2016):

Pixel values	Categories
0	No data
1	Saturated
2	Shadows
3	Cloud shadows
4	Vegetation
5	Bare soils
6	Water
7	Cloud low probability
8	Cloud medium probability
9	Cloud high probability
10	Thin cirrus
11	Snow / Ice

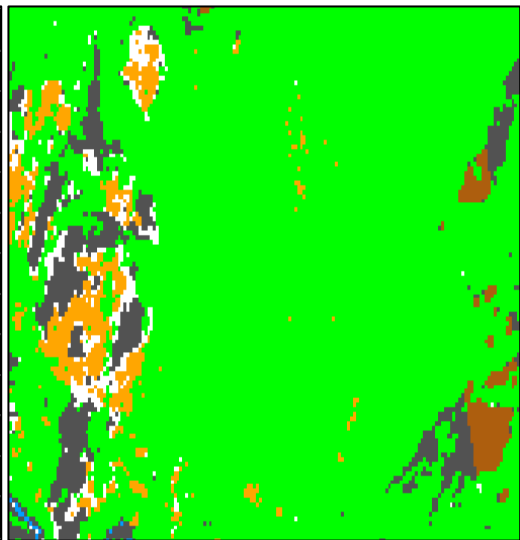


Figura 1. Ejemplo de imagen Sentinel 2 con las clases de SCL asociadas.

Tras la realización de un estudio sobre los principales índices utilizados en teledetección para el análisis de severidad y de los utilizados para la definición de perímetros de áreas quemadas (Tabla 1) se ha implementado un nuevo algoritmo que combina diversos índices, permitiendo generar una cartografía perimetral del incendio con diferenciación de las islas interiores no quemadas y que implementa también los diferentes grados de severidad de daños teniendo en cuenta el tipo de vegetación preexistente y el daño sufrido por ésta en el incendio.

Tabla 1.. Principales índices analizados para el estudio de severidad y perímetro de incendios.

Índice	Descripción	Referencia
NBR	<i>Normalized Burn Ratio</i>	Key & Benson, 2005
dNBR	<i>Difference Normalized Burn Ratio</i>	Key & Benson, 2005
BAI	<i>Burn Area Index</i>	Martín, M., 1998
BAIM	<i>Burn Area Index Modified</i>	González-Alonso et al., 2007
BAIS2	<i>Burn Area Index Sentinel 2</i>	Filipponi, 2018
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	Rouse et al., 1974
MIRBI	<i>Mid-Infrared Burn Index</i>	Venghani et al., 2015

MNDWI	<i>Modified Normalized Water Index</i>	Yun et al., 2016
RdNBR	<i>Relative diffenced NBR</i>	Miller & Thode, 2007
RBR	<i>Relativized Burn Ratio</i>	Parques, Dillon & Miller, 2014[RLL1]
EFFIS	<i>European Forest Fire Information System</i>	Key & Benson, 2005

El primer paso ha sido desarrollar un nuevo índice que permita generar un perímetro preciso de la superficie afectada y que no sólo genere el perímetro exterior, sino que también permita extraer las diferentes islas interiores que no se hayan visto afectadas por el fuego. Desde el proyecto EPyRIS se probaron diferentes combinaciones de índices (Tabla 2) con el objetivo de encontrar el índice o combinación de índices más eficiente para el objetivo perseguido.

Tabla 2.. Principales algoritmos de índices combinados estudiados.

Algoritmos implementados	
Multiindex	Combinación de NBR, SWIR y MIRBI
3BAIs	Combinación de BAI, BAIM y BAIS2
3dBAIs	Combinación de dBAI, dBAIM y dBAIS2

Tras varias pruebas, se ha creado un nuevo índice (3dBAIs) que permite delimitar la superficie realmente afectada por el incendio, de tal manera que se puede limitar el análisis de la severidad de los daños a la superficie afectada, siendo un algoritmo que al utilizar la complementariedad de varios índices minimiza los errores de omisión y comisión generados por ellos de manera independiente. Adicionalmente, se añade el índice MNDWI con la imagen post incendio para la eliminación de masas de agua ($MNDWI > -0.1$).

La comparación entre (i) los resultados obtenidos empleando los diferentes índices y combinaciones desarrolladas en el proyecto y (ii) los datos GPS tomados en campo en diversos incendios del área SUDOE (Figura 2) mostró los mejores resultados para el 3dBAIs (Tabla 3).



Figura 2. Espacio SUDOE (Sudoeste Europeo), constituido por regiones de Francia, España y Portugal.

Tabla 3. Porcentajes de coincidencia y no coincidencia en los diferentes índices analizados (se debe tener en cuenta que los perímetros medidos con GPS no excluyen todas las islas interiores no quemadas).

ÍNDICES	% de coincidencia	SUPERFICIE NO COINCIDENTE (ERRORES DE OMISIÓN Y COMISIÓN)
NBR	68	18
BAI	75	17
BAIM	76	17
BAIS2	81	15
MIRBI	76	51
dNBR	88	10
dBAI	83	13
dBAIM	86	12
dBAIS2	88	10
dMIRBI	74	22
RdNBR	87	11
RBR	84	11
MULTIINDEX	86	10
3BAIs	79	14
3dBAIs	91	10
EFFIS	81	20

Tras el cálculo del perímetro mediante el índice 3dBAIS (índice que ofrece mejores resultados, ver Tabla 3), se procedió a evaluar la severidad en la vegetación. En primer lugar, se tuvieron en cuenta diferentes estudios (Fornacca et al., 2018; Mpakairi et al., 2020; Parker et al., 2015; Picotte et al., 2011), donde se demostraba el comportamiento diferente de los índices espectrales, para un mismo nivel de severidad, en función del tipo y cantidad de vegetación (problemas de saturación). Por tanto, se genera una máscara de vegetación utilizando el índice NDVI pre-incendio (Tabla 4) que diferencia tres zonas (Sobrino et al., 2004):

- Vegetación densa: áreas con una actividad vegetativa alta, cubiertas con densos matorrales y arboladas.
- Vegetación escasa - no densa: áreas con media-alta actividad vegetativa normalmente cubiertas con matorrales o pastizales.
- Suelo: áreas con poca o prácticamente nula vegetación, generalmente correspondientes a suelos desnudos, carreteras, caminos, infraestructuras, etc.

Tabla 4. Umbrales escogidos para diferenciar la vegetación preexistente en la zona del incendio.

CLASE	UMBRALES
VEGETACIÓN DENSA	$NDVI \geq 0.5$
VEGETACIÓN NO DENSA	$0.2 \leq NDVI < 0.5$
SUELO	$NDVI < 0.2$

Esta distinción permite diferenciar las zonas para aplicar a cada una el análisis de severidad mediante el índice más adecuado, en función de la sensibilidad de estos índices a la señal del carbón

que generan. Con el fin de evaluar que índice es el más adecuado, para cada tipo de vegetación, se empleó el índice de separabilidad (SI) propuesto por Pereira, 2001. Cuanto mayor sea el valor de SI, mayor será la separabilidad entre clases, siendo uno el valor mínimo de separabilidad recomendado. La Tabla 5, muestra los índices cuyo valor SI obtenido es el mayor, en función del tipo de vegetación.

Tabla 5. Índices espectrales con mayor Índice de Separabilidad (SI) obtenido, para cada cubierta de vegetación.

CLASE	ÍNDICE	VALOR SI
VEGETACIÓN DENSA	dNBR	1.21
VEGETACIÓN NO DENSA	BAI	1.65

Se han establecido unos umbrales para cada uno de los índices empleados (dNBR y BAI), que se han ido ajustando conforme a los datos recopilados en diversas visitas de campo y teniendo en consideración tres grados de severidad diferenciados de forma visual para cada incendio. Estos umbrales independientes en cada uno de los dos índices de entrada (Tabla 6) se han ajustado a una leyenda común para dar homogeneidad a la cartografía resultante, generando 3 niveles de severidad: alta, media y baja.

Tabla 6. Umbrales escogidos para el cálculo de los niveles de severidad, en función de cada índice (dNBR o BAI).

NIVEL DE SEVERIDAD	UMBRALES ESCOGIDOS ($\mu \pm \sigma$ análisis)	
	dNBR	BAI
BAJA	$0.15 \leq \text{dNBR} < 0.5$	$150 \leq \text{BAI} < 200$
MEDIA	$0.5 \leq \text{dNBR} < 0.7$	$200 \leq \text{BAI} < 350$
ALTA	$\text{dNBR} \geq 0.7$	$\text{BAI} \geq 350$

El nivel “Severidad Alta” está asociado a aquellas zonas donde la vegetación ha quedado reducida a cenizas y el arbolado se ha visto fuertemente afectado, quedando reducida su presencia a algunas de las partes leñosas principales, sin nada de cobertura foliar. La importancia de esta clase está asociada a que son zonas en las que el riesgo de pérdida de los suelos es muy elevado, pues no existe ningún tipo de cubierta que pueda protegerlo de las escorrentías.

El nivel “Severidad Media” está asociado a aquellas zonas donde la vegetación se ha visto afectada por el fuego, pero aún conserva buena parte de la estructura leñosa, y las masas forestales principales aún no han perdido el follaje (copas soflamadas). Si bien en este nivel la vegetación se encuentra gravemente dañada, existen posibilidades de conservación del suelo, dado que el follaje caerá y lo protegerá en cierta medida de la acción erosiva.

El nivel “Severidad Baja” está asociado a superficies donde la cubierta vegetal previa era de baja densidad o en el caso de cubierta forestales, el fuego ha producido daños en la vegetación, pero aún conservan parte de su cubierta verde. En este caso, los daños en la vegetación pueden hacer que, pasado un cierto periodo de tiempo, estas masas forestales se encuentren en una situación equivalente a las de Severidad Media (sería detectable en una imagen posterior).

Por último, se recoge un cuarto nivel de severidad (“no quemado/muy baja severidad”), relacionado con zonas clasificadas como área quemada pero que no pertenecen a ninguno de los niveles de severidad anteriores. Esta circunstancia, lógica dada la utilización de índices diferentes para la determinación del perímetro y para la obtención de niveles de severidad, se ha encontrado normalmente relacionada con fuego de superficie bajo arbolado no afectado, (no quemado o muy baja severidad)

4. Resultados

Se han utilizado diversos incendios para la realización de los test de verificación de los resultados obtenidos en la metodología seleccionada, para ello se han realizado diversas visitas de campo para la comprobación “*in situ*” de los resultados, tanto de perímetros como de niveles de severidad. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en tres de los diferentes incendios analizados:

1- Resultados en el incendio de Nerva (Huelva, España), Agosto de 2018.

El incendio de Nerva fue declarado el jueves 2 de agosto de 2018 y se dio oficialmente por extinguido el viernes 10 de agosto de 2018. El área de estudio de este incendio, presenta un clima seco y cálido en verano: Csa, según la clasificación climática de Köppen (Kottek et al., 2006; Rubel and Kottek, 2010 & Rubel et al., 2017). La vegetación afectada por el fuego estaba compuesta principalmente por pino (*P. pinea* y *P. pinaster*), acompañado de encina (*Quercus ilex*) y eucalipto (*E. globulus* y *E. camaldulensis*). Un aspecto importante a tener en cuenta es el que el 25% aproximadamente de la superficie afectada pertenece al espacio natural protegido de Río Tinto y Monumento Natural Montería de Gossan. El área del incendio fue de 1.747,14 ha, donde la Figura 3 muestra los diferentes tipos de cobertura vegetal quemada.

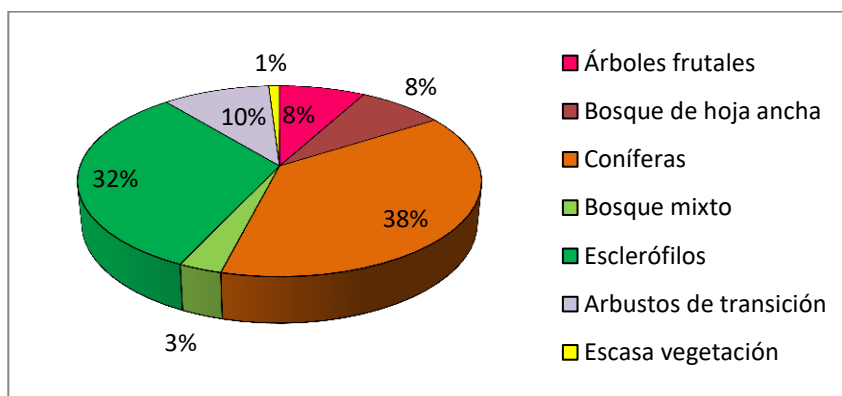


Figura 3. Tipos de cobertura vegetal presentes en el incendio de Nerva.

Las imágenes Sentinel 2 en nivel 2A utilizadas para el análisis han sido la del 31 de julio de 2018 (pre incendio) y la del 10 de agosto de 2018 (post-incendio).

En primer lugar, se ha realizado la generación del perímetro del incendio mediante la aplicación del 3dBAls, obteniendo como resultado la Figura 4.



Figura 4. Perímetro 3dBAIs obtenido en el incendio de Nerva, imagen Sentinel 2 RGB post incendio (10/08/2018).

Una vez se dispone del perímetro del incendio se procede con la generación de la máscara de vegetación NDVI (Figura 5) que definirá las zonas que se analizan con los índices dNBR o BAI.

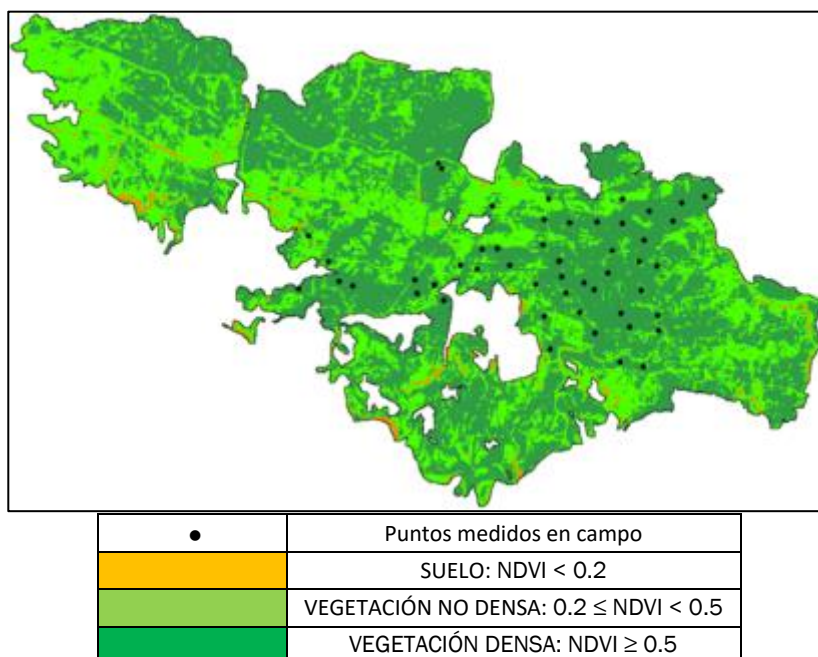


Figura 5. Imagen NDVI clasificada, obtenida de la imagen Sentinel 2 pre incendio (31/07/2018), junto con los puntos medidos en campo para evaluar la severidad.

Por último, se procede a la generación de los índices de severidad dNBR (áreas con vegetación densa) y BAI (áreas con vegetación no densa) y a la integración de ambos resultados generando la cartografía final de severidad (Figura 6).

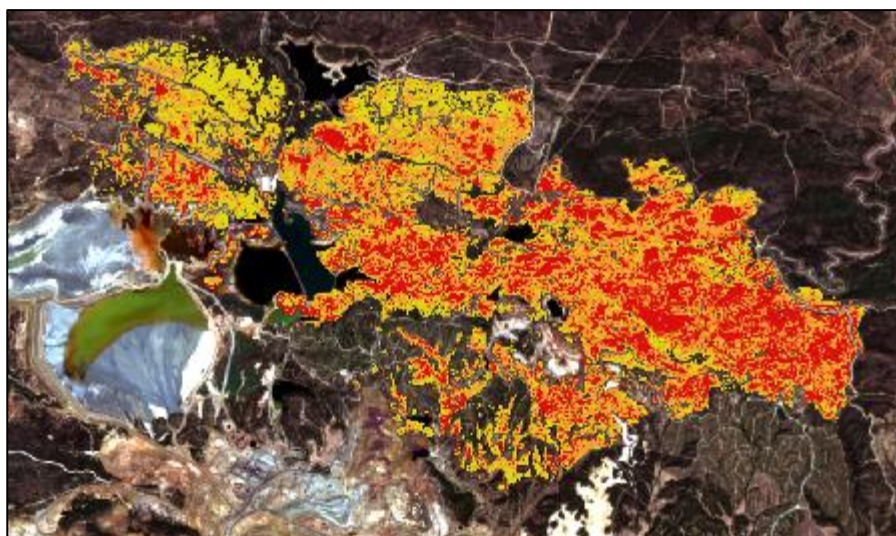


Figura 6. Perímetro 3dBAls obtenido en el incendio de Nerva, imagen Sentinel 2 RGB post incendio (10/08/2018).

2- Resultados en el incendio de Barchín del Hoyo (Cuenca, España), Julio de 2019

El incendio de Barchín del Hoyo fue declarado el martes 30 de julio de 2019 y se dio oficialmente por extinguido el martes 6 de agosto de 2019. El área de estudio de este incendio, presenta un clima seco y cálido en verano: Csa, según la clasificación climática de Köppen. La vegetación afectada por el fuego estaba compuesta principalmente por bosques de coníferas, acompañados de bosque mixto y cultivo de secano. El área del incendio fue de 1.966,69 ha, donde la Figura 7 muestra los diferentes tipos de cobertura vegetal quemada.

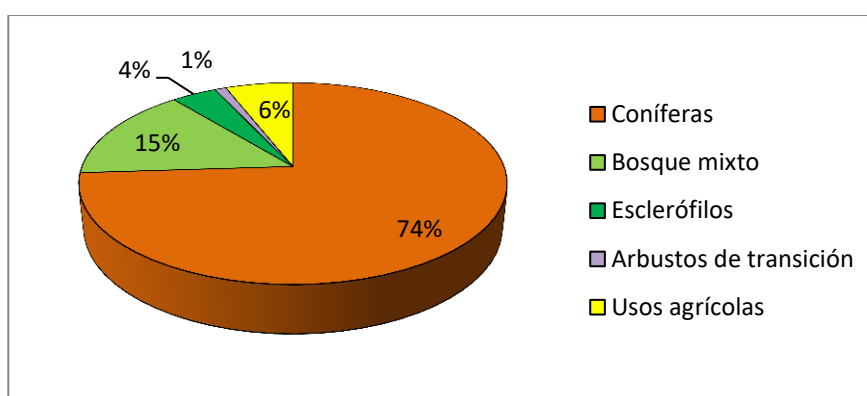


Figura 7. Tipos de cobertura vegetal presentes en el incendio de Barchín del Hoyo.

Las imágenes Sentinel 2 en nivel 2A utilizadas para el análisis han sido la del 28 de julio de 2019 (pre-incendio) y la del 9 de agosto de 2019 (post-incendio).

En primer lugar, se ha realizado la generación del perímetro del incendio mediante la aplicación del 3dBAls, obteniendo como resultado la Figura 8.

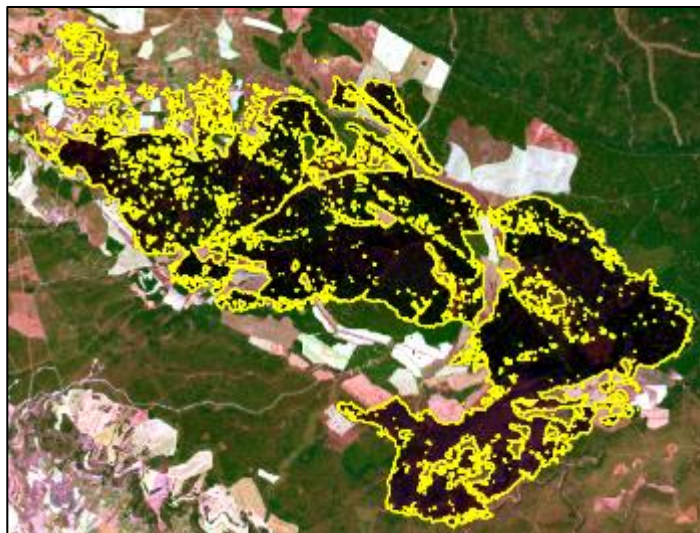


Figura 8. Perímetro 3dBAls obtenido en el incendio de Barchín del Hoyo, imagen Sentinel 2 RGB post incendio (09/08/2019).

Una vez se dispone del perímetro del incendio se procede con la generación de la máscara de vegetación NDVI (Figura 9) que definirá las zonas que se analizan con los índices dNBR o BAI.

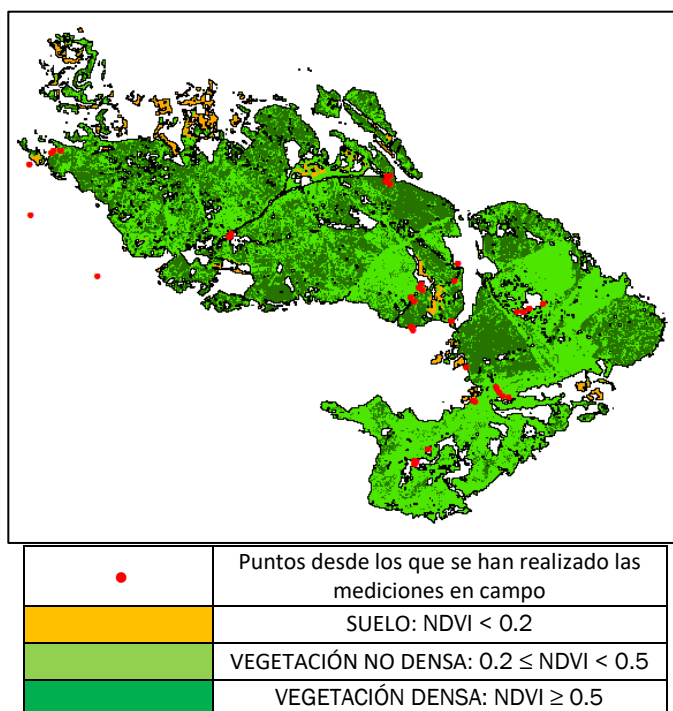


Figura 9. Imagen NDVI clasificada, obtenida de la imagen Sentinel 2 pre incendio (28/07/2019), junto con los puntos y panorámicas en campo para evaluar la severidad.

Por último, se procede a la generación de los índices de severidad dNBR (áreas con vegetación densa) y BAI (áreas con vegetación no densa) y la integración de ambos resultados generando la cartografía final de severidad (Figura 10).

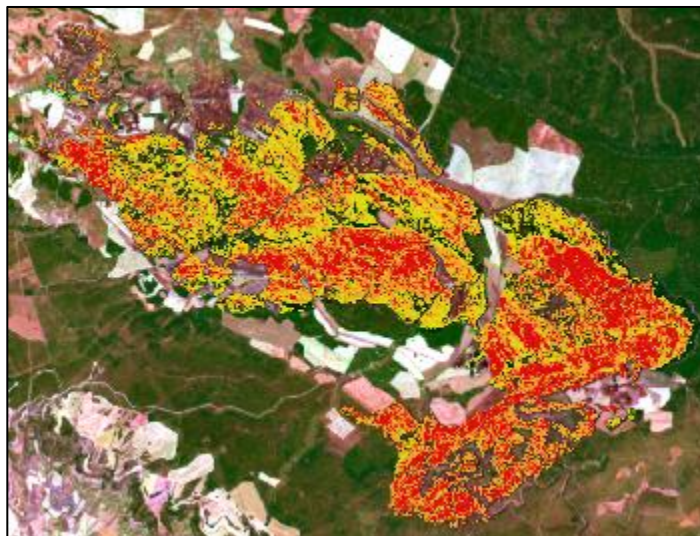


Figura 10. Perímetro 3dBAls obtenido en el incendio de Barchín del Hoyo, imagen Sentinel 2 RGB post incendio (09/08/2019).

3- Resultados en el incendio de Guadarrama (Segovia, España), Agosto de 2019

El incendio de Guadarrama fue declarado el domingo 4 de agosto de 2019 y se dio oficialmente por extinguido el miércoles 7 de agosto de 2019. El área de estudio de este incendio, presenta un clima seco y suave en verano: Csb, según la clasificación climática de Köppen. Un aspecto importante a tener en cuenta es el que 200 ha aproximadamente de la superficie afectada pertenecen al espacio natural Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. La vegetación arbórea afectada por el fuego se distribuye entre las siguientes clases: bosques de coníferas, bosque mixto, páramos y brezales, vegetación esclerófila. El área del incendio fue de 359,99 ha, donde la Figura 11 muestra los diferentes tipos de cobertura vegetal quemada.

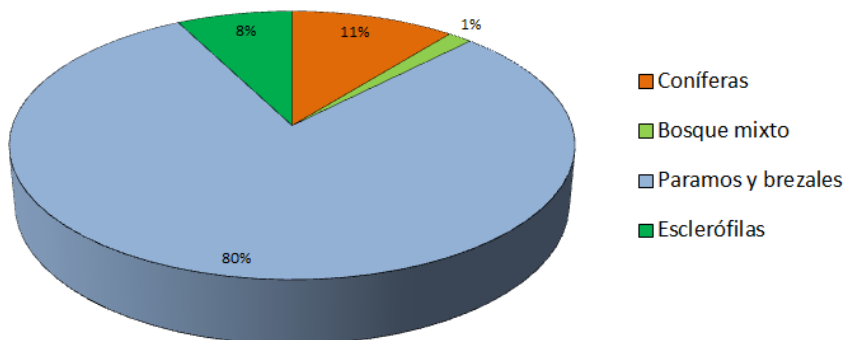


Figura 11. Tipos de cobertura vegetal presentes en el incendio de Guadarrama.

Las imágenes Sentinel 2 en nivel 2A utilizadas para el análisis han sido la del 2 de agosto de 2019 (pre-incendio) y la del 12 de agosto de 2019 (post-incendio).

En primer lugar, se ha realizado la generación del perímetro del incendio mediante la aplicación del 3dBAls, obteniendo como resultado la Figura 12.

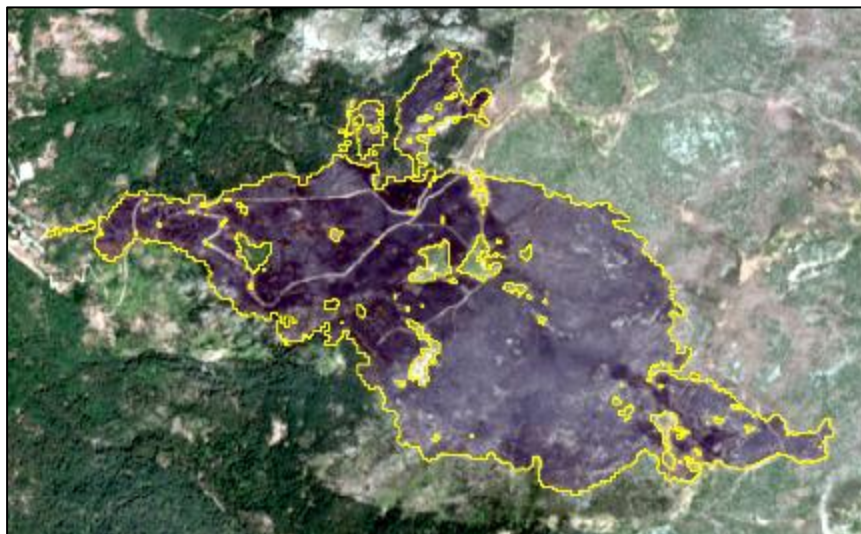


Figura 12. Perímetro 3dBAls obtenido en el incendio de Guadarrama, imagen Sentinel 2 RGB post incendio (12/08/2019).

Una vez se dispone del perímetro del incendio se procede con la generación de la máscara de vegetación NDVI (Figura 13) que definirá las zonas que se analizan con los índices dNBR o BAI.

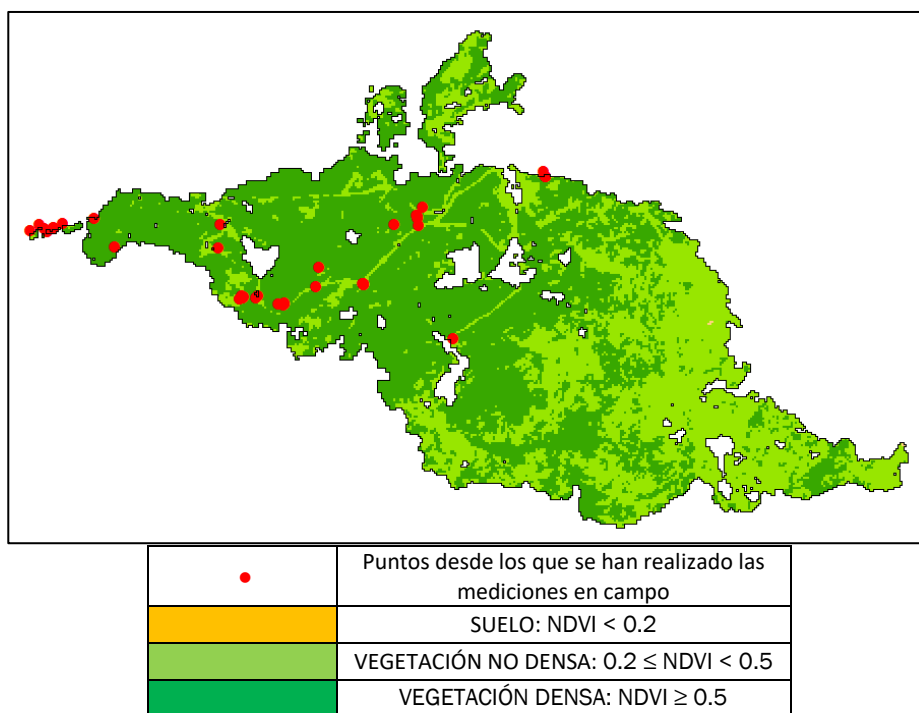


Figura 13. Imagen NDVI clasificada, obtenida de la imagen Sentinel 2 pre incendio (02/08/2019), junto con los puntos y panorámicas en campo para evaluar la severidad.

Por último, se procede a la generación de los índices de severidad dNBR (áreas con vegetación densa) y BAI (áreas con vegetación no densa) y la integración de ambos resultados generando la cartografía final de severidad (Figura 14).

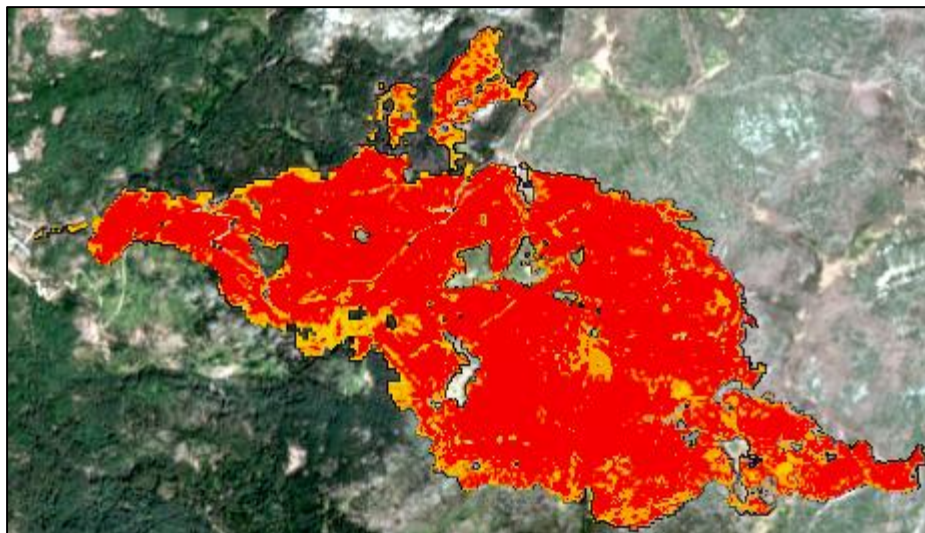


Figura 14. Perímetro 3dBAls obtenido en el incendio de Guadarrama, imagen Sentinel 2 RGB post incendio (12/08/2019).

5. Discusión

A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior se ha procedido al análisis de los resultados en base a los datos obtenidos en campo obteniéndose una serie de matrices de resultados (Tabla 7;

Tabla 8; Tabla 9). Se debe tener en cuenta que, la escasez de puntos de validación existente y su distribución desigual, es debido a distintos factores como: la complicada accesibilidad a algunas zonas del incendio, la poca variabilidad de severidad en algunos incendios o la rapidez con la que se tenía que realizar la validación.

Tabla 7. Matriz de validación con datos de campo en el incendio de Nerva.

Matriz de confusión Severidad Nerva		Verdad Terreno					
		No quemado	Baja	Media	Alta	TOTAL	%Comisión
Severidad Teledetección	No quemado	0	0	0	0	0	-
	Baja	0	0	1	1	2	100
	Media	0	1	16	5	22	27
	Alta	0	0	9	21	30	30
	TOTAL	0	1	26	27	54	
	Omisión	-	100	38	22		kappa 0.40

Tabla 8. Matriz de validación con datos de campo en el incendio de Barchín del Hoyo.

Matriz de confusión Severidad Barchín del Hoyo		Verdad Terreno					
		No quemado	Baja	Media	Alta	TOTAL	%Comisión
Severidad Teledetección	No quemado	5	1	1	1	8	38
	Baja	0	3	0	0	3	0
	Media	0	0	7	2	9	22
	Alta	0	0	0	6	6	0
	TOTAL	5	4	8	9	26	
	Omisión	0	25	13	33		kappa 0.74

Tabla 9. Matriz de validación con datos de campo en el incendio de Guadarrama.

Matriz de confusión Severidad Guadarrama		Verdad Terreno					
		No quemado	Baja	Media	Alta	TOTAL	%Comisión
Severidad Teledetección	No quemado	7	1	0	0	8	38
	Baja	0	0	0	0	0	0
	Media	0	0	6	0	6	22
	Alta	0	0	5	23	28	0
	TOTAL	7	1	11	23	42	
	Omisión	0	100	45	0		kappa 0.75

Tabla 10. Matriz de validación con datos de campo para los tres incendios estudiados (Nerva, Barchín del Hoyo y Guadarrama).

Matriz de confusión Severidad Guadarrama		Verdad Terreno					
		No quemado	Baja	Media	Alta	TOTAL	%Comisión
Severidad Teledetección	No quemado	12	2	1	1	16	25
	Baja	0	3	1	1	5	40
	Media	0	1	29	7	37	22
	Alta	0	0	14	50	64	22
	TOTAL	12	6	45	59	122	
	Omisión	0	50	36	15		kappa 0.63

Teniendo en cuenta los valores de kappa obtenidos es posible afirmar que existe una concordancia considerable (Tabla 11) entre los puntos de severidad medidos en campo y la cartografía obtenida de severidad, excepto para el incendio de Nerva, que muestra una fuerza de concordancia moderada ($kappa=0.53$). Hay que tener en cuenta que los datos de campo para este incendio fueron de los primeros que se tomaron para el desarrollo de la metodología, por lo que en incendios posteriores se fue mejorando la metodología de toma de muestras en campo.

Tabla 11. Interpretación de los valores de kappa.

Valores de kappa	Fuerza de la concordancia
< 0	Nula
0 - 0.19	Pobre
0.20 - 0.39	Aceptable
0.40 - 0.59	Moderada
0.60 - 0.79	Considerable
0.80 - 1.00	Casi perfecta

En cuanto a los errores de omisión y comisión, si se observa la Tabla 10, la severidad baja es la que peor resultados ofrece (50% y 40%, respectivamente). A pesar de ser un aspecto a revisar en futuras campañas de campo, se consideró como objetivo fundamental la correcta clasificación de la severidad alta (errores inferiores a 25%, en ambos casos), dado que es la que mayores problemas post-incendio conlleva, en términos de riesgo de erosión y pérdida de suelo.

6. Conclusiones

Se ha desarrollado y ensayado una metodología estándar que se considera válida para el análisis de incendios en el ámbito SUDOE, aplicando técnicas de Teledetección a las imágenes capturadas por los satélites Sentinel-2 del programa Copernicus de la ESA (imagen pre y post-incendio de la zona afectada).

Por una parte, ha sido posible establecer un perimetral que se ajusta al área quemada en cada incendio (identificando islas internas, etc.), mediante la aplicación directa de un índice combinado formado por la diferencia de 3 índices, nombrado como 3dBAls. Por otra, también ha sido posible generar una cartografía de severidad que muestra una fuerza de concordancia considerable con la

realidad, como se ha demostrado con la validación posterior utilizando datos de campo mediante una asignación rápida de niveles de severidad en base a una clave visual.

La metodología desarrollada en base al análisis de la severidad teniendo en cuenta la vegetación previa para la utilización del índice apropiado según el tipo de vegetación, nos permite generar una cartografía rápida y precisa de perímetro quemado y niveles de severidad que minimiza la edición y procesados manuales sobre los resultados obtenidos. Ofrece por tanto una base de información de gran utilidad tanto en un diagnóstico temprano sobre las áreas incendiadas, que puede ser llevada a campo para los primeros análisis in situ, como en combinación con otras informaciones (pendientes, suelos, parámetros de cuenca, etc.), con la finalidad de completar valoraciones de mayor alcance y ayudar en la definición de áreas prioritarias de intervención post incendio.

7. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo ofrecido por el personal del *Centro de Investigación Forestal de Lourizán* y de la *Office National Des Forêts*, socios del proyecto EPyRIS, así como su participación en las campañas de campo para el ajuste de los niveles de severidad. También agradecer por supuesto la inestimable colaboración del personal desplazado a los incendios por el grupo TRAGSA, que nos han permitido acceder a las diferentes zonas afectadas por los incendios para la realización de validaciones de resultados, tanto en el perimetrado de los incendios como en zonas de afección de la vegetación, con los que ha sido posible ajustar los umbrales a aplicar en la generación de la cartografía de severidad.

8. Bibliografía

BERGAMASCHI, P.; HEIN, R.; BRENNINKMEIJER, C.A.; CRUTZEN, P.J.; 2000. Inverse modeling of the global CO cycle: 2. Inversion of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope ratios. *J. Geophys. Res. Atmos.* 105 (D2), 1929–1945.

BOSCHETTI, M.; STROPPIANA, D.; BRIVIO, P.A.; 2010. Mapping burned areas in a Mediterranean environment using soft integration of Spectral Indices from high-resolution satellite images. *Earth Int.*, 14, 1–20.

CHUVIECO, E.; 2009. Global impacts of fire. *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–10.

Copernicus Open Access Hub. Available online:
<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (acceso 18 diciembre 2020).

Emergency Mapping Service (EMS). Disponible online:
<https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR250> (acceso 18 diciembre 2020).

EMSR213. Forest Fire in Southern Italy. 2016. Disponible online:
<http://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR213> (acceso 18 de diciembre 2020).

ESA, 2015. Sentinel-2 User Handbook. European Spatial Agency, p. 64. ESA Standard Document.

ESCUIN, S.; NAVARRO, R.; FERNÁNDEZ, P.; 2008. Fire severity assessment by using NBR (normalized burn ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *Int. J. Remote Sens.* 29 (4), 1053–1073.

European Forest Fire Information System (EFFIS). Disponible online: <http://effis.jrc.ec.europa.eu/applications/data-request-form/> (acceso 18 diciembre 2020).

FERNÁNDEZ-MANSO, A.; FERNÁNDEZ-MANSO, O.; QUINTANO, C.; 2016. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 50, 170–175.

FILIPPONI, F.; 2019. Exploitation of Sentinel-2 time series to map burned areas at the national level: a case study on the 2017 Italy Wildfires. *Remote Sensing* 11 (6), 622.

HUANG, H.; ROY, D.; BOSCHETTI, L.; ZHANG, H.; YAN, L.; KUMAR, S.; et al.; 2016. Separability analysis of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) data for burned area discrimination. *Remote Sens.* 8 (10), 873.

Instituto para a Conservação da Natureza e das Florestas. Disponible online: <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/mapas> (acceso 18 diciembre 2020).

KEY, C. H.; BENSON, N. C.; 2005. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In 'FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System'. (Eds DC Lutes, RE Keane, JF Caratti, CH Key, NC Benson, LJ Gangi) USDA Forest Service, Rocky Mountains Research Station General Technical Report, in press.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F.; 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

LASAPONARA, R; 2006. Estimating spectral separability of satellite derived parameters for burned areas mapping in the Calabria region by using SPOT-Vegetation data. *Ecol. Modell.*, 196, 265-270.

LLORENS, R.; SOBRINO, J.A.; FERNÁNDEZ, C.; FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M.; VEGA, J.A.; 2020. A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data. Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, Volume 95, 102243.

LUTES, D.C.; KEANE, R.E.; CARATTI, J.F.; KEY, C.H.; BENSON, N.C.; SUTHERLAND, S.; GANGI, L.J.; 2006. FireMON: fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO, p. 164, 1 CD.

LINDER, M.; MAROSHEK, M.; NETHERER, S.; KREMER, A.; BARBATI, A.; GARCIA-GONZALO, J.;

et al.; 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* 259 (4), 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>.

MALLINIS, G.; MITSOPOULOS, I.; CHRYSAFI, I.; 2018. Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. *Glsci. Remote Sens.* 55 (1), 1–18.

MARTIN, M. D. P.; CHUVIECO, E; 1998. Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR.

MILLER, JD.; THODE, AE; 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Rem Sens Env* (in press).

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Disponible online: <https://www.mapa.gob.es/es/> (acceso 18 diciembre 2020).

NAVARRO, G.; CABALLERO, I.; SILVA, G.; PARRA, P.C.; VÁZQUEZ, A.; CALDEIRA, R.; 2017. Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 58, 97–106.

RUBEL, F.; BRUGGER, K.; HASLINGER, K.; AUER, I.; 2017. The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800-2100. *Meteorol. Z.*, 26, 115-125.

RUBEL, F.; KOTTEK, M.; 2010. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Z.*, 19, 135-141. DOI: 10.1127/0941-2948/2010/0430.

SEILER, W.; CRUTZEN, P.J.; 1980. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Clim. Change* 2 (3), 207–247.

SOBRINO, J. A.; JIMENEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L.; 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, 90(4), 434-440.

SOVEREL, N.; PERRAKIS, D.; COOPS, N.; 2010. Estimating Burn Severity from Landsat Dnbr and RdNBR Indices across Western Canada. *Remote Sens. Environ.*, 114, 1896-1909.

SOUSA, W.P.; 1984. The role of disturbance in natural communities. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 15 (1), 353–391.

VAN DER MEER, F.D.; VAN DER WERFF, H.M.A.; VAN RUITENBEEK, F.J.A.; 2014. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sens. Environ.* 148, 124–133.

VAN DER WERFF, H.M.A.; VAN DER MEER, F.D.; 2015. Sentinel-2 for mapping iron absorption feature parameters. *Remote sens.* 7 (10), 12635–12653.

VEGA, J.A.; FONTURBEL, T.; FERNANDEZ, C.; ARELLANO, A.; DIAZ-RAVIÑA, M.; CARBALLAS, T.; MARTIN, A.; GONZALEZ-PRIETO, S.; MERINO, A.; BENITO, E.; 2013. Acciones Urgentes Contra La Erosión En Áreas Forestales Quemadas: Guía Para Su Planificación En Galicia (Santiago de Compostela).

VELEZ, R.; SALAZAR, M.; TROENESGAARD, J.; SAIGAL, R.; WADE, D. D.; LUNDSFORD, J.; 1990. Fire. *Unasylva* (English ed.), 41(162), 3-38.

VHENGANI, L.; FROST, P.; LAI, C.; BOOI, N.; VAN DEN DOOL, R.; RAATH, W; 2015. Multitemporal burnt area mapping using Landsat 8: Merging multiple burnt area indices to highlight burnt areas. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International* (pp. 4153-4156). IEEE.

VILAR, L.; CAMIA, A.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; MARTIN, M.P.; 2016. Modeling temporal changes in human-caused wildfires in Mediterranean Europe based on land use-land cover interfaces. *For. Ecol. Manage.* 378, 68–78.

VUOLO, F.; ŽÓLTAK, M.; PIPITONE, C.; ZAPPA, L.; WENNG, H.; IMMITZER, M.; ATZBERGER, C.; et al.; 2016. Data service platform for Sentinel-2 surface reflectance and value-added products: System use and examples. *Remote Sensing*, 8(11), 938.