



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
julio · 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 de la severidad en el suelo provocada por los incendios forestales de Galicia en 2020 mediante el uso de la Teledetección

LLORENS COMPANY, R.¹, SOBRINO RODRÍGUEZ, J.A.¹, FERNÁNDEZ, C.², FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M.², VEGA, J.A.²

¹ Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI) de la Universidad de Valencia.

² Centro de Investigación Forestal de Lourizán (CIF), Xunta de Galicia.

Resumen

La Teledetección es una herramienta de gran utilidad en el estudio de los incendios forestales. La severidad del fuego determina el riesgo de incremento de escorrentía y la erosión, después de incendio. En este trabajo se presenta una estimación de la severidad del suelo causada por los incendios forestales ocurridos en Galicia en 2020. El estudio se ha realizado utilizando todas las posibles combinaciones de bandas en índices espectrales de diferencia normalizada (NDSI), obtenidas con imágenes del satélite Sentinel-2 (ESA) y se ha validado mediante muestreos de campo, obteniéndose un mapa final donde la severidad aparece clasificada en función de cuatro niveles de severidad del suelo diferentes (nula, baja, media y alta). Los resultados obtenidos se evaluaron mediante el coeficiente R^2 y matrices de confusión. Este trabajo se realiza en el contexto del proyecto “Estrategia conjunta para la Protección y Restauración de los ecosistemas afectados por Incendios forestales” (EPyRIS).

Palabras clave

Sentinel-2, índices, erosión, fuego, EPyRIS.

1. Introducción

Los incendios forestales representan la principal amenaza en el ámbito forestal europeo (SANMIGUEL-AYANZ et al., 2018). A consecuencia del cambio climático, los veranos son cada vez más calurosos y secos, lo que provoca un aumento significativo de la superficie afectada por los incendios, de pérdidas ambientales (emisión de CO_2 y erosión del suelo) y económicas (OMI, 2015; PYNE, 2001). En España, la pérdida de peso del sector agro-forestal, ha originado un desconocimiento de los recursos forestales, provocando su abandono y favoreciendo la virulencia de los incendios (PERNAS et al., 2012). En el interior del territorio español, destaca la región de Galicia, con menos del 10% de la superficie nacional, pero representa el 45% de los incendios ocurridos y el 23% de la superficie afectada de España en las últimas décadas (PERNAS et al., 2012).

Dentro de los efectos de un incendio forestal, es esencial distinguir entre los daños causados a la vegetación y los causados al suelo, en función de características como: tipo de vegetación, modelos de combustible o comportamiento del fuego, entre otros (JAIN et al., 2004; JAIN & GRAHAM, 2007; FERNÁNDEZ et al., 2020). Una correcta cuantificación de los efectos de los incendios forestales en el suelo, es de vital importancia de cara a una evaluación y planificación de las tareas de restauración de ecosistemas, cuyo objetivo es la reducción del riesgo de escorrentía y erosión (MOODY et al., 2016; FERNÁNDEZ et al., 2021). El riesgo de erosión es mayor cuando la masa forestal ubicada en las copas de los árboles desaparece por completo, a diferencia de las copas donde la masa forestal solo se ha visto afectada parcialmente, ya que la presencia de acículas permite la infiltración del agua reduciendo la movilización de sedimentos tras el incendio (CERDÀ Y DOERR 2008; FERNÁNDEZ et al. 2020). Por ende, las zonas quemadas a evaluar con mayor interés para aplicar medidas urgentes contra la erosión post-incendio, son aquellas en las que la vegetación se consume casi por completo durante el incendio.

Para poder clasificar las zonas de actuación por riesgo de erosión dentro de un incendio forestal de una manera precisa, es necesario el conocimiento de los niveles de severidad de suelo existentes. La mayoría de las clasificaciones de los niveles de severidad de suelo se basan en indicadores de cambios en la cubierta orgánica del suelo y en la superficie del suelo mineral (cambios de color o estructura) además de la deposición de cenizas procedentes de la combustión de la biomasa o del propio suelo (FERNÁNDEZ et al., 2016). Sin embargo, junto con la aplicación in situ de este tipo de clasificaciones, en grandes incendios se requiere de una herramienta como la Teledetección que permita la obtención de mapas de severidad en diferentes escalas, de forma rápida y precisa (CHUVIECO, 2009). Dentro de las diferentes fuentes de información que proporciona la Teledetección, la constelación de satélites Sentinel-2, posibilita la obtención de imágenes con una resolución espacial media-alta (10-60 m), una resolución espectral de 13 bandas (entre 440 y 2200 nm, aproximadamente) y una resolución temporal de 5 días (DRUSCH et al., 2012). Dentro de la resolución espectral, las regiones del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), muestran un mayor contraste entre niveles de severidad: el valor de reflectividad en el NIR desciende debido a la desaparición de la vegetación activa, mientras que el valor de reflectividad en el SWIR, aumenta por la pérdida de humedad, mayor exposición del suelo y menores sombras proyectadas por la vegetación (ESCUIN et al., 2008; DELEGIDO et al., 2018). Esto explica el uso global de índices espectrales, tales como el *Normalized Burn Ratio* (NBR), mediante la combinación de bandas en las regiones NIR y SWIR, como uno de los más utilizados en el estudio de incendios (KEY & BENSON, 2005). Sin embargo, las nuevas bandas incorporadas de Sentinel-2 en el vértice rojo, pueden aumentar el potencial del uso de índices espectrales en el ámbito de incendios forestales (FERNÁNDEZ-MANSO et al., 2016).

2. Objetivos

El propósito de este trabajo, es el de establecer una relación entre la severidad del suelo medida in situ en los incendios ocurridos en Galicia (NW España) en el verano de 2020, y los resultados obtenidos a partir de todas las combinaciones de bandas posibles del satélite Sentinel-2, con el fin de obtener un mapa de clasificación de severidad de suelo que permita la planificación de tareas para la reducción del riesgo de erosión.

3. Metodología

El área de estudio del trabajo realizado comprende los grandes incendios forestales (más de 500 Ha) ocurridos en Galicia, en el año 2020. Esos incendios quemaron más de 8000 Ha entre el julio y septiembre (Figura 1), afectando tanto a zonas forestales como a zonas de interfaz urbano-forestal. Los incendios afectaron, principalmente, nueve municipios: Lobios, Flariz, San Millao, Verín, Chandrexa de Queixa, Cadavos (A Mezquita), Cernado (Manzaneda), Vilariño y Cualedro. A partir de datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2006), se extrae que cerca del 70% de la superficie de Galicia es forestal, de la que el 64% está cubierta por árboles como coníferas y eucaliptos, principalmente (MANUEL y GIL, 2006). Los incendios seleccionados para este estudio, afectaron principalmente a cubiertas forestales de *Pinus pinaster* Ait. (pino marítimo) y matorrales de *Cytisus striatus* (Hill.) Rothm., *Erica australis* L., *Pterospartum tridentatum* (L.) Willk. y *Ulex gallii* Planch.

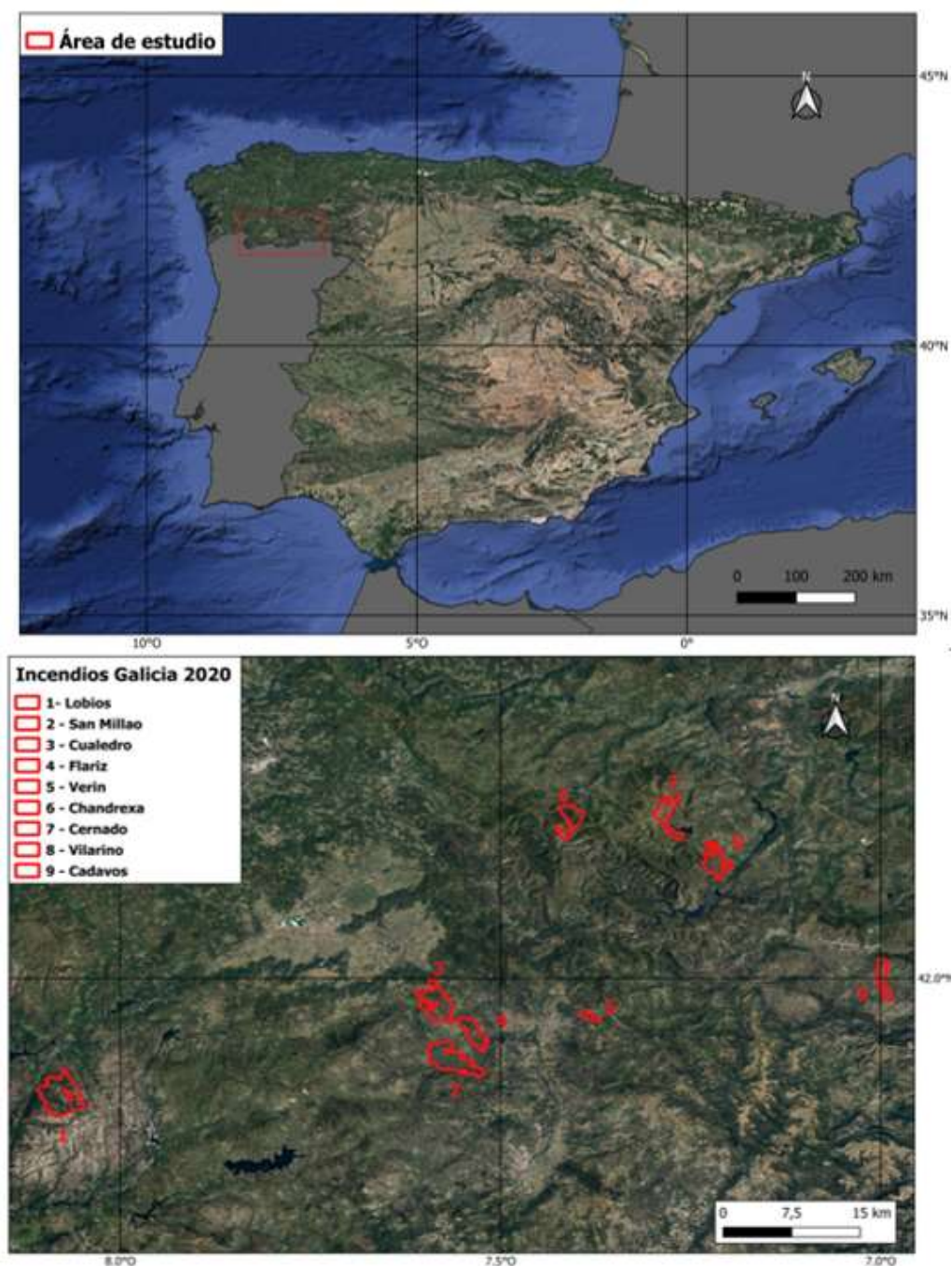


Figura1. Área de estudio del trabajo realizado que comprende los grandes incendios forestales (más de 500 Ha) ocurridos en Galicia, en el año 2020. Sistema de Coordenadas de referencia WGS84, EPSG:4326.

Para cada uno de los incendios mostrados en la Figura 1, se realizaron una serie de muestreos dando prioridad a las zonas que cumplan algunos criterios relacionados con la vulnerabilidad a los riesgos post-incendio como: una pedregosidad superficial inferior al 50%, una pendiente superior al 20% o zonas donde no se hayan realizado plantaciones recientes (FERNÁNDEZ et al., 2019.). Básicamente, las zonas de bosques y matorrales que han sufrido incendios de copa, son la más vulnerables, ya que no tienen la protección de las hojas caídas de las copas quemadas y la erosión depende únicamente de la severidad del fuego en el suelo

(FERNÁNDEZ et al., 2020). Con ayuda de la Teledetección, se clasificaron las zonas de árboles y matorral que hayan sufrido fuego de copas, como aquellas prioritarias para el muestreo en campo.

Una vez definidas las zonas de muestreo, se realizó un inventario en campo, teniendo en cuenta, previamente, los siguientes aspectos: número de parcelas y clasificación de los niveles de severidad en suelo. El número de parcelas, se obtuvo a partir de la guía "Acciones urgentes contra la erosión en áreas forestales quemadas" (VEGA et al., 2013). La clasificación de los niveles de severidad en suelo, se basa en función de indicadores visuales de alteración de la cubierta orgánica y suelo mineral, propuestos por FERNÁNDEZ & VEGA en 2016 y resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los niveles de severidad en el suelo propuestos por Fernández & Vega en 2016.

Nivel de severidad en el suelo	Descripción
Nula (0)	Suelo no afectado, en absoluto, por el fuego.
Muy bajo (1)	Cubierta orgánica aún reconocible. Sin cambios en el suelo mineral. Presencia de raicillas finas. El nivel de repelencia al agua del suelo, no ha sido modificado por el fuego.
Bajo (2)	Quedan restos carbonosos de la consunción de la hojarasca y mantillo sobre el suelo mineral intacto. Puede haber depósitos de ceniza procedentes de la combustión de la vegetación y de la cubierta orgánica del suelo. Sin cambios en el suelo mineral. Presencia de raicillas finas. El nivel de repelencia al agua del no ha sido modificado por el fuego.
Moderado (3)	Cobertura del estrato orgánico del suelo completamente consumida. Se conserva su estructura y las raíces finas superficiales pueden estar parcialmente consumidas. El suelo superficial presenta repelencia generalmente, siendo habitual detectarla justo debajo del nivel más superficial.
Alto (4)	Consunción total de la cubierta orgánica del suelo; predomina el color gris y es evidente una deposición abundante de ceniza mineral. La pérdida de estructura es muy clara y también la consunción de raicillas en una profundidad inferior o igual a 1 cm. El suelo superficial no presenta repelencia, siendo habitual detectarla en los centímetros inmediatamente inferiores a la superficie, en función de la profundidad hasta la que se observan las alteraciones descritas.
Muy alto (5)	Igual que la severidad alta, pero alcanzando profundidades superiores a 1 cm.
Extremo (6)	Consunción total de la materia orgánica del suelo; predomina el color naranja a rojizo. La pérdida de estructura es muy clara y también la consunción de raicillas. El suelo superficial no presenta repelencia, siendo habitual detectarla en los centímetros inmediatamente inferiores a la superficie. Esta profundidad depende de la profundidad a la que han llegado las alteraciones descritas. En los casos más extremos, por debajo de este nivel subyace un nivel alto e, incluso, por debajo de éste un nivel moderado antes de alcanzar el suelo sin alterar.

A partir del conocimiento de las variables anteriores y con la ayuda de un GPS, se establecieron dos transectos de 40 metros de longitud, haciendo coincidir su punto medio con el centro de la parcela. Uno de los transectos se establece con un rumbo aleatorio y el otro es perpendicular al primero. Estos transectos se definen utilizando banderas de señalización y cinta

métrica. Una vez definido, se genera un inventario en campo anotando el número de parcelas y la clasificación de los niveles de severidad en suelo. Para evaluar la severidad del suelo, se localiza una muestra de 30 x 30 cm en cada transecto cada 2 metros, a la que también se le mide el valor dominante de los indicadores visuales de severidad del fuego. El ratio de pedregosidad superficial se estima visualmente localizando un 1 x 1 m cada 4 m en los transectos. Una vez finalizado el inventario, se extrae la media de la severidad del suelo para cada parcela. En total, en este estudio se midieron 140 parcelas, donde la distribución de los valores de severidad del suelo fueron los siguientes: 20 parcelas de severidad nula (sin quemar), 1 parcela de severidad muy baja, 61 parcelas de severidad baja, 45 parcelas de severidad moderada, 12 parcelas de severidad alta y 1 parcela de severidad muy alta. A pesar de observar la presencia de puntos cuya severidad del suelo era extrema, éstos se encontraron de forma inusual, siendo insignificantes desde el punto de vista estadístico.

Mediante el conocimiento de la posición exacta de cada parcela de campo a partir de la coordenada central medida con el GPS, se descargaron todas las imágenes Sentinel-2 necesarias, ya corregidas atmosféricamente (KAUFMAN & SENDRA, 1988) y teniendo en cuenta la fecha más próxima (libre de nubes) al muestreo en campo. La Tabla 2, muestra la información más relevante sobre las bandas de las imágenes Sentinel-2 (DELEGIDO et al., 2018). Una vez descargadas, se aplicó un pre-procesado a cada una de las bandas: se recortaron a partir del perímetro de los incendios, se remuestrearon a la resolución espacial más alta (10 m) y se les aplicó una máscara de nubes (GASCÓN et al., 2017).

Tabla 2. Información espectral espacial de las bandas Sentinel-2.

Número de banda	Nombre	Longitud de onda central (nm)	Resolución espacial (m)
B1	Aerosol	443.9	60
B2	Azul	496.6	10
B3	Verde	560	10
B4	Rojo	664.5	10
B5	Infrarrojo cercano (NIR)	703.9	20
B6	Infrarrojo cercano (NIR)	740.2	20
B7	Infrarrojo cercano (NIR)	782.5	20
B8	Infrarrojo cercano (NIR)	835.1	10
B8A	Infrarrojo cercano (NIR)	864.8	20
B9	Vapor de Agua	945	60
B10	Cirrus	1373.5	60
B11	Infrarrojo de onda corta (SWIR)	1613.70	20
B12	Infrarrojo de onda corta (SWIR)	2202.4	20

A partir de los 140 puntos georreferenciados del muestreo, se dividió la muestra en parcelas de entrenamiento (40%) y parcelas de validación (60%). Esta división se realizó de forma aleatoria, pero teniendo en cuenta que ambos tipos de parcelas tuvieran el mismo rango de severidad en suelo (tanto las parcelas de entrenamiento como las de validación, tenían valores para cada nivel de severidad). Las parcelas de entrenamiento, sirvieron para extraer los valores de reflectividad de cada banda y para cada incendio. La extracción se hizo mediante un área de influencia o *buffer*, calculada mediante un SIG y cuyo tamaño era exactamente igual al tamaño de la parcela medida en campo (polígono de 20 metros de radio). Para cada incendio, se calcularon todos los índices espectrales de diferencia normalizada (NDSI) posibles, cuya formulación matemática se define como una resta entre la reflectividad en dos bandas diferentes dividida por la suma de la reflectividad en esas mismas dos bandas (CHUVIECO et al., 2006). Por último, se calculó el coeficiente de determinación R^2 para un ajuste lineal de los diferentes índices NDSI con el nivel de severidad de suelo obtenido en campo. A partir de los valores de R^2 estimados, se seleccionaron las

3 mejores combinaciones de bandas (valor más alto de R^2) y se obtuvieron las ecuaciones lineales entre el nivel de severidad del suelo y el NDSI. Estas ecuaciones se han aplicado a las imágenes Sentinel-2, elaborándose diferentes mapas de severidad de suelo. Además, cada uno de los mapas de severidad de suelo obtenidos a partir de las parcelas de validación, se validaron utilizando como estadístico la matriz de confusión (errores de omisión y de comisión) y el índice kappa, que mide la precisión global de una clasificación en comparación con la misma clasificación realizada de forma aleatoria (LILLESAND et al., 2007). Los posibles valores del estadístico kappa se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. 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	Casi perfecta

4. Resultados

Las 3 mejores combinaciones de bandas Sentinel-2, obtenidas a partir de los valores más altos de R^2 , se muestran en la Tabla 4, junto con la ecuación correspondiente entre la correlación de cada índice espectral de diferencia normalizada (NDSI) y el valor de severidad en el suelo (SS). También se muestra la gráfica de correlación lineal para la combinación de bandas con mayor R^2 (Figura 2).

Tabla 4. Resultados de la correlación entre los valores de severidad de suelo medidos in situ (SS) y los índices espectrales de diferencia normalizada (NDSI): Coeficiente de determinación (R^2) y ecuación de las correlaciones. Se muestran los tres mejores resultados.

Combinación de bandas	Ecuación	R^2
$NDSI = (B6 - B12) / (B6 + B12)$	$SS = -3,227 * NDSI + 0,989$	0,68
$NDSI = (B7 - B12) / (B7 + B12)$	$SS = -3,010 * NDSI + 1,209$	0,65
$NDSI = (B8 - B12) / (B8 + B12)$	$SS = -2,975 * NDSI + 1,272$	0,63

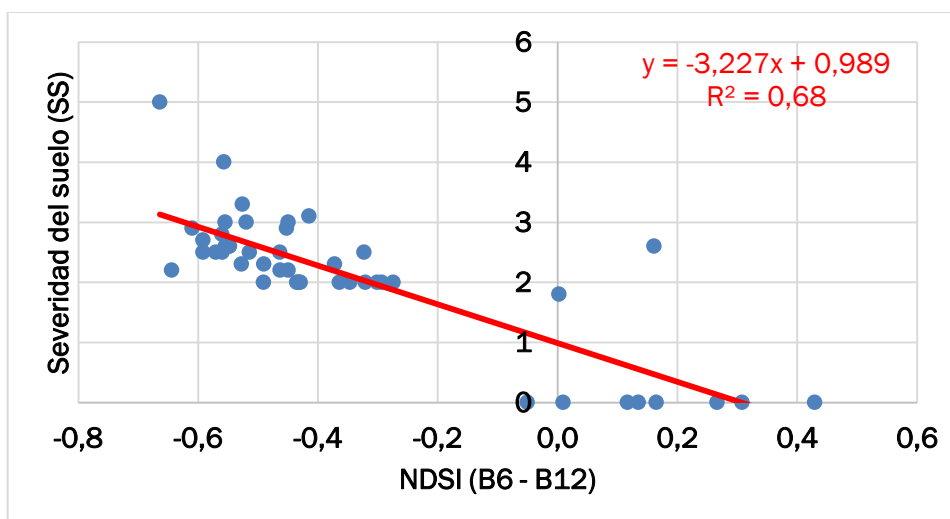


Figura 2. Gráfica de correlación entre los valores de severidad de suelo medidos in situ (SS) y los índices espectrales de diferencia normalizada (NDSI) para la mejor combinación de bandas (R^2 más alto, bandas: B6-B12).

En los resultados de la Tabla 4, se observa que la mejor correlación se obtiene con las bandas 6 y 12 (ver Tabla 2) correspondientes al infrarrojo cercano (NIR) y al infrarrojo de onda corta (SWIR), respectivamente. Además, el resto de combinaciones que ofrecen los mejores resultados estadísticos, también son combinaciones entre la región del NIR y del SWIR, siendo la combinación de bandas 8 y 12, la correspondiente al índice NBR propuesto por KEY & BENSON en 2005.

A partir de las ecuaciones de la Tabla 4, se calculó un mapa de severidades de suelo para cada combinación de bandas. Dada la desigualdad en la densidad de puntos por nivel de severidad de suelo, se decidió reclasificar los niveles de severidad de suelo (Tabla 1) del siguiente modo: los niveles de severidad baja con muy baja, y los niveles de severidad alta con muy alta, dando como resultado un mapa de severidad de suelo clasificado en cuatro niveles (severidad nula, baja, moderada y alta). La Figura 3, muestra un ejemplo de mapa de severidad de suelo para el incendio de Lobios (incendio con mayor extensión quemada) utilizando la mejor combinación de bandas (Tabla 2).

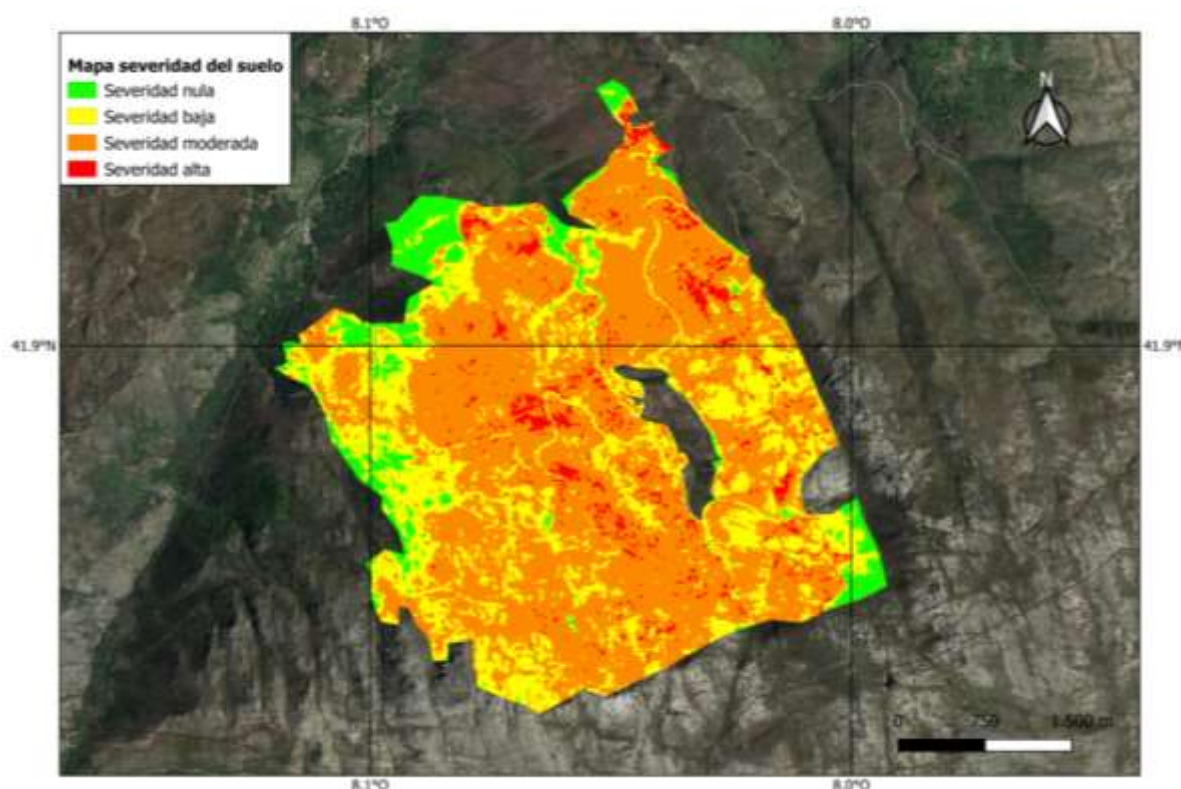


Figura 3. Mapa de severidad de suelo para el incendio de Lobios (incendio con mayor extensión quemada) utilizando la ecuación de la mejor combinación de bandas según la Tabla 4 (R^2 más alto, bandas: B6-B12). Sistema de Coordenadas de referencia WGS84, EPSG:4326.

Como método de validación de los tres algoritmos NDSI, se presentan los siguientes resultados: error de omisión (OM), error de comisión (COM) e índice kappa (k) en la Tabla 5. La validación se llevó a cabo para todos los incendios, utilizando el 60% de las parcelas de campo (84 parcelas). Se observa como los tres índices espectrales escogidos tienen una fuerza de concordancia entre considerable y casi perfecta (0,73 a 0,84, ver Tabla 3).

Tabla 5. Resultados estadísticos obtenidos tras el proceso de validación: fiabilidad del usuario, fiabilidad del productor, error de omisión (OM), error de comisión (COM) e índice kappa (k).

Bandas NDSI	Severidad del suelo	OM	COM	k
B6 y B12	Nula	12,50	0	0,84
	Baja	10,30	7,10	
	Moderada	6,30	21,10	
	Alta	20	0	
B7 y B12	Nula	12,50	0	0,76
	Baja	13,80	3,9	
	Moderada	0	33,30	
	Alta	80	0	
B8 y B12	Nula	12,50	12,50	0,73
	Baja	17,20	4	
	Moderada	0	33,30	
	Alta	80	0	

5. Discusión

La mayor parte de estudios enfocados a la detección de severidad del fuego (ARELLANO et al., 2017; HUDAK et al., 2007), utilizan índices de campo en los que se combina la severidad del suelo y la vegetación. Este tipo de índices, como el CBI y GeoCBI, son de gran utilidad para evaluar los daños generales de un incendio. Sin embargo, algunos autores sugieren la necesidad de evaluar por separado la severidad de la vegetación y del suelo, ya que estos componentes del ecosistema pueden verse afectados de forma diferente por los incendios forestales en función de la estructura del rodal y del comportamiento del combustible y del fuego (JAIN & GRAHAM, 2007; FERNÁNDEZ et al. 2020). Para propósitos como la estimación del riesgo de erosión post-incendio, se recomienda utilizar protocolos focalizados exclusivamente en el suelo (VEGA et al., 2008; FERNÁNDEZ et al., 2008), tal y como se ha realizado en este estudio.

A diferencia del estudio realizado por VAN WAGTENDONK et al., en 2004, este estudio encontró una correlación lineal entre índices espectrales y la severidad de suelo (en vez de una regresión potencial). Se observa como el índice espectral que ofrece mejores resultados R^2 es la combinación de bandas 6 y 12 (regiones del infrarrojo cercano y de onda corta, respectivamente) con un resultado de 0,68. A pesar de ser combinaciones de bandas diferentes, el resto de índices espectrales con mayor R^2 , también utilizaban las mismas regiones espectrales (CHUVIECO et al., 2006). La investigación llevada a cabo por SOBRINO et al., en 2019, estimó una mayor correlación entre índices espectrales (dNBR y dNDVI) y la severidad del suelo en los incendios de Galicia de 2017, que la obtenida en este estudio (R^2 igual a 0,72, en el mejor de los casos, frente a un R^2 igual a 0,68 en este estudio). No obstante, existe una diferencia considerable entre el número de parcelas utilizadas por SOBRINO et al., 2019 (71 parcelas) y las utilizadas en este trabajo (140 parcelas).

Los errores de omisión y comisión, junto con el estadístico kappa, muestran como la combinación de bandas 6 y 12, representa los mejores resultados (menor porcentaje de errores, tanto de omisión como de comisión, en todos los niveles de severidad del suelo, y mayor índice kappa). A pesar de ello, las tres combinaciones de bandas con mejores resultados tienen un índice kappa alto (superior al 0,7) pero cometiendo dos de ellas un error de omisión del 80 % en la severidad alta (es decir, el 80 % de los puntos cuya severidad de suelo medida en campo era alta, fueron clasificados con otro nivel de severidad). El estudio realizado por COCKE et al., en 2005,

donde se analizaron 91 parcelas (método de campo CBI) de un incendio de Arizona (USA) en 2001, obtuvo un resultado kappa inferior al obtenido en este estudio (0,63). Sin embargo, obtuvo mejores resultados en severidades nulas (0% de error de omisión) e iguales en severidades altas (20% de error de omisión) que las obtenidas en este estudio.

6. Conclusiones

El objetivo principal de este estudio ha sido el de establecer una relación práctica que permita estimar la severidad en el suelo, en los grandes incendios de Galicia 2020, mediante índices espectrales obtenidos con imágenes Sentinel-2 y parcelas de campo, siguiendo el protocolo de propuesto por FERNÁNDEZ & VEGA en 2016, y con el fin de obtener un mapa de clasificación de severidad de suelo que permita la planificación de tareas para la reducción del riesgo de erosión.

Se ha dejado patente la potencialidad de las imágenes Sentinel-2, cuya resolución espectral cuenta con diferentes bandas en las regiones del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta, en el estudio de la severidad del suelo dentro del ámbito de los incendios forestales. Además, se ha hecho especial hincapié en el uso de muestreos de campo focalizados exclusivamente en la severidad del suelo, para una posterior planificación de tareas preventivas de riesgo de erosión y escorrentía. Sin embargo, a pesar de los buenos resultados obtenidos, la necesidad de futuras líneas de investigación para poder aplicar esta metodología en incendios de diferentes características (clima, pendiente, severidad, ...), es imprescindible.

7. Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias al programa Interreg SUDOE del proyecto EPyRIS SOE2/P5/E0811. Además, los autores quieren agradecer el apoyo ofrecido por el personal del Centro de Investigación Forestal de Lourizán (CIF), por permitir las campañas de campo y la creación de parcelas con las que se ha obtenido la base de datos de niveles de severidad de suelo, utilizada en este estudio.

8. Bibliografía

ARELLANO, S.; VEGA, J.A.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; FERNÁNDEZ, C.; VEGA-NIEVA, D.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; RUIZ-GONZÁLEZ, A.D.; 2017. Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Rev. Teledetección*, 49, 49–61.

CHUVIECO, E., RIAÑO, D., DANSON, F. M. & MARTIN, P.; 2006. Use of a radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research*, 111(G4). <https://doi.org/10.1029/2005JG000143>.

DELEGIDO, J., PEZZOLA, A., CASELLA, A., WINSCHER, C., URREGO, E. P., JIMENEZ, J. C., Y MORENO, J.; 2018. Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-8. *Revista de Teledetección*, (51), 47-60.

DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sens. Environ.* 120, 25–36.

FERNÁNDEZ, C. & VEGA, J.A.; 2016. Modelling the effect of soil burn severity on soil erosion at hillslope scale in the first year following wildfire in NW Spain. *Earth Surf. Process. Landf.*, 41, 928–935.

FERNÁNDEZ, C., J.A. VEGA, AND FONTÚRBEL, T.; 2016. Reducing post-fire soil erosion from the air: Performance of heli-mulching in a mountainous area on the coast of NW Spain. *Catena* 147: 489–495. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.005>.

FERNÁNDEZ, C., J.A. VEGA, AND T. FONTÚRBEL.; 2020. Comparison of the effectiveness of needle cast and straw helimulching for reducing soil erosion after wildfire in NW Spain. *J Soils Sediments* 20 (1): 535–541. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02419-y>.

FERNÁNDEZ, C., VEGA, J. A., FONTURBEL, T., JIMÉNEZ, E., & PÉREZ-GOROSTIAGA, P.; 2008. Effects of wildfire, salvage logging and slash manipulation on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in Orense (NW Spain). *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 1294-1304.

FERNÁNDEZ-MANSO, A., FERNÁNDEZ-MANSO, O., QUINTANO, C.; 2016. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discrimination burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50, 170-175. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.005>

GASCON, F.; BOUZINAC, C.; THÉPAUT, O.; JUNG, M.; FRANCESCONI, B.; LOUIS, J.; LANGUILLE, F.; 2017. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sens.* 9, 584.

HUDAK, A.T.; MORGAN, P.; BOBBITT, M.J.; SMITH, A.M.S.; LEWIS, S.A.; LENTILE, L.B.; ROBICHAUD, P.R.; CLARK, J.T.; MCKINLEY, R.A.; 2007. The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects. *Fire Ecol.*, 3, 64–90.

JAIN TB & GRAHAM RT.; 2007. The Relation Between Tree Burn Severity and Forest Structure in the Rocky Mountains. *Paper presented at the 2005 National Silviculture Workshop*.

KAUFMAN, Y. & SENDRA, C.; 1988. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 9, 1357–1381.

KEY, C. H., BENSON, N.; 2005. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. Lutes, Duncan C.; Keane, Robert E.; Caratti, John F.; Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; Sutherland, Steve; Gangi, Larry J. 2006. Gen. Tech. Rep. RMRS -GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J.W.; 2007. Digital image interpretation and analysis. In *Remote Sensing and Image Interpretation*; 6th ed.; Chapter 7; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA; pp. 585-592.

MANUEL, C.; DIAZ-FERNÁNDEZ, P.; GIL, L.; 2006. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. *In Tercer Inventario Forestal Nacional 1997–2006*, Barcelona; Ministerio de Medio Ambiente: Madrid, Spain, 2006

PERNAS, J. B., GARCÍA, M. L. L., & MARTÍN, J. P.; 2012. Estudio de la casualidad de los incendios forestales en Galicia. *Economía agraria y recursos naturales*, 12(1), 99-114.

SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DURRANT, T., BOCA, R., LIBERTÀ, G., BRANCO, A., DE RIGO, D., & LERAY, T; 2018. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2017. *Publications Officer of the European Union*. doi, 10, 663443.

SOBRINO, J. A., LLORENS, R., FERNÁNDEZ, C., FERNÁNDEZ-ALONSO, J. M., & VEGA, J. A.; 2019. Relationship between soil burn severity in forest fires measured in situ and through spectral indices of remote detection. *Forests*, 10(5), 457.

VAN WAGTENDONK, J.W.; ROOT, R.R.; KEY, C.H.; 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sens. Environ.* 92, 397–408.