



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

9CFE-1550

Organiza





Evaluación de la severidad del fuego en ecosistemas mediterráneos de diferente gestión forestal utilizando imágenes de Sentinel-2 y PlanetScope: un estudio de caso en paisajes quemados de Chile y España

BELTRÁN-MARCOS, D. (1), SARRICOLEA, P. (2), FARRIS, M (2), SUÁREZ-SEOANE, S (3), FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M. (1) y CALVO, L. (1)

(1) Área de Ecología, Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León, 24071 León, España

(2) Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Portugal 84, Santiago 8331051, Santiago, Chile

(3) Departamento de Biología de Organismos y Sistemas (BOS, Universidad de Oviedo) e Instituto de Investigación de la Biodiversidad (IMIB; CSIC - Universidad de Oviedo - Principado de Asturias). 33071 Oviedo, 33600 Mieres (España)

Resumen

La gestión de los usos de suelo y el cambio climático han contribuido a una drástica alteración del régimen natural de incendios, con eventos más extremos en los ecosistemas mediterráneos de todo el mundo. El objetivo del estudio fue evaluar la severidad de los incendios en bosques mediterráneos a través de métricas de teledetección derivadas de imágenes satelitales Sentinel-2 (10 m/píxel), y PlanetScope (3 m/píxel). Se analizaron dos grandes incendios: (1) el primero ocurrido en 2022 en el noroeste de España (25.227 ha), y (2) el segundo ocurrido en 2023 en la zona central de Chile (4.676 ha), que afectaron a pinares mediterráneos bajo diferente tipo de gestión forestal. La severidad se evaluó con siete índices espectrales validados en campo mediante el índice CBI (Composite Burn Index). El índice espectral dNBR-EVI de Sentinel-2 mostró los mejores valores de correlación para ambos incendios ($R^2_{cv} = 0.82$ y 0.90 , respectivamente). Se observó una mayor proporción de superficie afectada por alta severidad en ecosistemas mediterráneos chilenos, donde el nivel de intervención en el paisaje por parte de la población y administración es menor. En España se encontró una mayor heterogeneidad espacial de las situaciones con alta, moderada y baja severidad. Este estudio respalda que una gestión forestal adecuada puede mitigar el daño de los incendios forestales en los ecosistemas mediterráneos a escala global.

Palabras clave

Incendio forestal, índices espectrales, índice de campo, paisaje mediterráneo, severidad, teledetección

1. Introducción

En los últimos años, las temporadas extraordinarias de incendios en la biorregión mediterránea están relacionadas con condiciones meteorológicas extremas, como sequías severas y olas de calor, unidas a una mayor disponibilidad y continuidad del combustible (LABBÉ et al., 2023; RODRIGUES et al., 2023). Concretamente en Chile, los incendios forestales quemaron más de 430.000 hectáreas en 2023 y causaron la pérdida de un gran número de vidas, lo que llevó al gobierno a declarar el estado de emergencia en múltiples regiones del país (DUARTE et al., 2024). Por su parte, en países mediterráneos del sur de Europa, como España, los incendios forestales de 2022 arrasaron más de 310.000 hectáreas con eventos singulares de comportamiento extremo (BELTRÁN-MARCOS et al., 2024), convirtiéndose en una de las peores temporadas de incendios jamás registradas (SAN-MIGUEL-AYANZ et al., 2023). De hecho, estos incendios extremos son cada vez más frecuentes en las regiones mediterráneas (TEDIM et al., 2018) y se caracterizan



por afectar grandes áreas con alta severidad del fuego (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2023a; BELTRÁN-MARCOS et al., 2024).

La severidad, definida como el grado de cambio ecológico inducido por el fuego (KEY & BENSON, 2005; FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2018), es un atributo clave del régimen de incendios para entender los impactos de los incendios en los ecosistemas mediterráneos. Este parámetro no solo está vinculado intrínsecamente al comportamiento del fuego en eventos extremos (KEELEY, 2009), sino que también refleja los efectos sobre la resiliencia ecológica y la multifuncionalidad de los ecosistemas, afectando su capacidad para proveer servicios esenciales como la protección del suelo, la biodiversidad y el almacenamiento de carbono (HUERTA et al., 2022; FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2023b). Dada la diversidad de los paisajes mediterráneos y los distintos niveles de intervención que estos presentan, resulta esencial evaluar con precisión la severidad del fuego, particularmente en ecosistemas con diferentes grados de gestión, ya que estas evaluaciones son fundamentales para diseñar estrategias de gestión adaptativas (RODRIGUES et al., 2023). Por ejemplo, en Chile, las grandes plantaciones a menudo reemplazan cubiertas terrestres más ricas en carbono o con mayor biodiversidad como los bosques nativos, pudiendo socavar la resiliencia de estos ecosistemas mediterráneos (HEILMAYR et al., 2020). Por tanto, una evaluación fiable de la severidad del fuego no solo permite cuantificar los impactos inmediatos del incendio en estos sistemas tan homogéneos, sino que también proporciona datos fundamentales para diseñar estrategias de gestión preventiva, orientadas a reducir la vulnerabilidad del ecosistema y fortalecer su resistencia y resiliencia frente a futuros incendios extremos (RODRIGUES et al., 2023).

La estimación de la severidad se realiza principalmente utilizando dos enfoques: mediciones de campo y recuperación de datos de teledetección. En campo, métodos como el "Composite Burn Index" (CBI) de KEY & BENSON (2005) proporcionan una base sólida para cuantificar los efectos ecológicos del fuego a través de la evaluación de indicadores visuales individuales en estratos de vegetación y suelo. Sin embargo, su aplicación en incendios de gran magnitud es limitada, ya que las evaluaciones en terreno no pueden cubrir la totalidad del área afectada y en muchas ocasiones no es viable operacionalmente (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2023a). Por ello, el uso de los productos derivados de la teledetección se ha convertido en indispensable, ya que son capaces de detectar los cambios espectrales y térmicos ocurridos en la superficie terrestre y asociados con el consumo de vegetación y la exposición del suelo (MILLER et al., 2009; HAMILTON et al., 2023). En este contexto, los sensores satelitales como Sentinel-2 MSI, del programa europeo Copernicus, tienen características muy aprovechables respecto a otras constelaciones satelitales como Landsat (GARCÍA-LLAMAS et al., 2019), ya que se benefician de una resolución temporal, espacial y espectral mejorada, la cual ha demostrado ser muy exitosa para la evaluación de incendios forestales en paisajes mediterráneos heterogéneos (FERNÁNDEZ-MANSO et al., 2016; VIEDMA et al., 2020). Sin embargo, la alta variabilidad espacial a escala fina de la severidad en paisajes heterogéneos generados por combinaciones complejas de comunidades vegetales, tipos de suelo y restos leñosos gruesos (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2020) podría no capturarse adecuadamente a la escala espacial de productos generados con Sentinel-2 MSI. La disponibilidad abierta actual de instrumentos de última generación de la misión Copernicus, como la constelación de satélites PlanetScope, permite estimar cambios espectrales producidos por el fuego en 8 bandas con una alta resolución espacial (3 m) y con un tiempo de



revisión casi diario (ANDREATA et al., 2022). Sin embargo, no se dispone de evidencia científica previa que haya evaluado el potencial de las imágenes de PlanetScope para monitorear los efectos ecológicos posteriores a los incendios validados con datos de campo.

2. Objetivos

El objetivo principal del estudio fue evaluar y comparar la severidad de incendios forestales ocurridos en ecosistemas mediterráneos de Chile y España mediante el uso de teledetección (imágenes Sentinel-2 y PlanetScope) y métodos de campo (CBI). Específicamente, nos propusimos: 1) identificar el índice espectral y el sensor más adecuado para estimar la severidad de cada incendio observada en campo, y 2) determinar la relación entre la severidad y los ecosistemas presentes en paisajes mediterráneos con diferentes niveles de intervención forestal. Con estos objetivos, esta investigación pretende proporcionar herramientas clave para optimizar la gestión post-incendio en diferentes paisajes mediterráneos.

3. Metodología

3.1 Zonas de estudio

Para este estudio se seleccionaron dos incendios forestales ocurridos en áreas representativas de biorregiones climáticas de tipo mediterráneo con diferente contexto de gestión forestal: el noroeste de España y la zona central de Chile (Figura 1). La primera zona de estudio se localiza en la Sierra de la Culebra (Zamora, Castilla y León, España) donde en la temporada de verano boreal de 2022 se quemaron 25.228 hectáreas dominadas por pinares mediterráneos de *Pinus pinaster* Ait. y *Pinus sylvestris* L., masas forestales de frondosas de *Quercus pyrenaica* Willd., y *Quercus ilex* L., y matorrales poblados predominantemente por *Pterospartum tridentatum* (L.) Willk., *Cistus ladanifer* L., y *Erica australis* L. Esta área se caracteriza por una gestión forestal activa y regulada, que incluye prácticas como clareos, limpieza de matorrales, reforestación, o levantamiento de cortafuegos, que permiten sostener los múltiples servicios ecosistémicos de la zona y la heterogeneidad del paisaje (IGLESIAS et al., 2022).

La segunda zona de estudio se sitúa en Coelemu (Itata, Región del Ñuble, Chile), donde un incendio ocurrido en el verano austral de 2023 afectó 4.676 hectáreas de ecosistemas mediterráneos, con presencia de extensas plantaciones de *Pinus radiata* D. Don., y *Eucalyptus globulus* Labill., bosques nativos de *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst., matorrales dominados por *Genista monspessulana* L., y extensas áreas cubiertas de pasto y cultivo vitícola. A diferencia de la región española, esta área presenta un menor nivel de intervención en la gestión forestal, dirigida principalmente a mantener el ciclo intensivo de producción de madera, resultando en paisajes más homogéneos y con una menor diversidad estructural y funcional (CERDA et al., 2020).

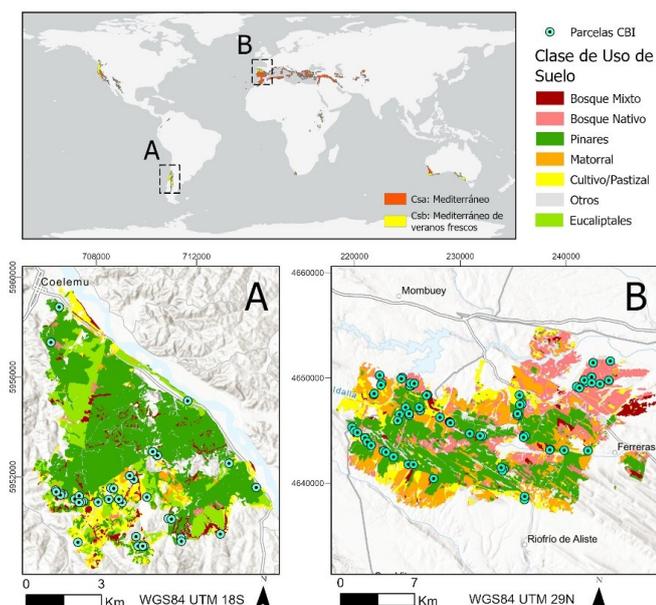


Figura 1. Localización y clases de uso de suelo de los incendios forestales empleados en este estudio a lo largo de las regiones climáticas mediterráneas de Köppen: (A) Coelemu, Chile, y (B) Sierra de la Culebra, España.

3.2 Estimación en campo de la severidad del fuego

Aproximadamente un mes después de cada incendio forestal, realizamos una evaluación de la severidad estableciendo 96 parcelas de campo ($n= 60$ en Sierra de la Culebra; $n= 36$ en Coelemu) de 20 m x 20 m de tamaño en parches homogéneos (en términos de especies vegetales dominantes y efectos del fuego). Se estableció una separación mínima entre parcelas de 100 m y cada una de ellas se georreferenció utilizando un receptor GPS con un error cuadrático medio (RMSE X,Y) < 0,5 m. En cada parcela, se aplicó el protocolo del CBI (KEY & BENSON, 2005) en su versión adaptada a ecosistemas mediterráneos (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2018), la cual mejora la consistencia ecológica de las estimaciones a corto plazo en esta biorregión.

El procedimiento de estimación de la severidad consistió en calificar una serie de indicadores en cinco estratos específicos: (i) estrato de sustrato, (ii) vegetación < 1 m (hierbas, arbustos bajos y plántulas de árboles), (iii) vegetación de 1–5 m (arbustos altos y árboles pequeños), (iv) vegetación de 5–20 m (árboles intermedios), y (v) vegetación > 20 m (árboles altos). La escala utilizada fue semicuantitativa, variando de 0 (sin cambios) a 3 puntos (máxima severidad del fuego), con un valor promedio de severidad calculado para cada estrato. El puntaje de severidad a nivel de parcela se obtuvo de la media de los puntajes de todos los estratos evaluados (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2023a). A partir de este puntaje, se establecieron tres niveles de severidad en campo: baja ($CBI < 1,25$), media ($1,25 \leq CBI \leq 2,25$) y alta ($CBI > 2,25$).

3.3 Imágenes de teledetección y preprocesamiento

Para estimar la severidad espectral se obtuvieron datos de dos sensores satelitales: Sentinel-2 MSI y PlanetScope SuperDove (PSB.SD). Las imágenes Sentinel-2 MSI incluyen 13 bandas reflectantes con diferente resolución espacial:



cuatro bandas correspondientes a la región del visible (B2 azul, 458-523nm; B3 verde, 543-578nm; B4 rojo, 650-680nm) e infrarrojo cercano (B8 NIR 1, 785-899nm) a 10 m/píxel; seis bandas correspondientes al borde rojo (B5, 698-713nm; B6, 733-748nm; B7, 773-793nm), infrarrojo cercano estrecho (B8A NIR 2, 855-875nm) e infrarrojo de onda corta (B11 SWIR 1, 1.565-1.655nm y B12 SWIR 2, 2.100-2.280nm) a 20 m/píxel; y tres bandas de 60 m/píxel (B1, 432-453nm; B9, 935-955nm, B10, 1.358-1.389nm) para caracterizar aerosoles, corrección de vapor de agua y nubes cirros. Las bandas de Sentinel-2 a 20m de resolución espacial se remuestrearon a 10m utilizando el algoritmo de superresolución “Sen2Res” en SNAP, que aplica técnicas de aprendizaje automático para proporcionar una mejor precisión espacial en la imagen manteniendo la coherencia espectral (LANARAS et al., 2018). Las bandas a 60m fueron descartadas ya que están fuertemente afectadas por efectos atmosféricos y no proporcionan valores de reflectancia significativos de la afección del fuego en la parte superior del dosel de vegetación. Se adquirieron imágenes libres de nubes previas y posteriores a cada incendio con un nivel de procesamiento 2A corresponde a la reflectancia por debajo de la atmósfera (BOA) desde el sitio web Copernicus Data Space (<https://dataspace.copernicus.eu/>). Este producto de nivel 2A ya está corregido atmosférica y topográficamente por el proveedor de imágenes mediante el procesador Sen2Cor.

Las imágenes PlanetScope PSB.SD, obtenidas de la constelación de satélites Dove de Planet Labs (<https://www.planet.com/explorer/>), proporcionan una resolución espacial de 3 m/píxel. Cada imagen de PlanetScope PSB.SD contiene ocho bandas espectrales: las bandas visibles (B2 azul, 465-515nm; B3 verde 1, 513-549nm; B4 verde 2, 547-583nm; B5 amarillo, 600-620nm; B6 rojo, 650-680nm), banda correspondiente al borde rojo (B7, 697-713nm), infrarrojo cercano (B8, NIR, 845-885nm), y bandas adicionales de corrección (B1 azul costero, 431-452nm). De cada incendio forestal, recopilamos imágenes pre y post-incendio con ausencia de nubes y un nivel de procesamiento “Analytic Surface Reflectance” (nivel 3B), que representa la reflectancia de la superficie corregida atmosféricamente. Para asegurar una radiometría coherente, las imágenes de PlanetScope se armonizaron con Sentinel-2 MSI permitiendo comparaciones directas entre los valores de reflectancia.

3.4 Estimación de la severidad espectral

Entre la amplia gama de métricas de teledetección existentes en la literatura, evaluamos el desempeño de siete índices espectrales reflectivos calculados a través de la combinación de diferentes bandas (Tabla 1). Se calcularon los índices espectrales bi-temporales dNDVI, dNDVIRE, dGNDVI y dEVI, así como el índice espectral monotemporal SAVI para las imágenes de Sentinel-2 MSI y PlanetScope PSB.SD. En el caso de Sentinel-2 MSI, se utilizó la banda de infrarrojo cercano estrecho (B8A) para el cálculo de estos índices, ya que ofrece una alta correspondencia espectral con otras fuentes satelitales. El índice SAVI incluyó una constante de calibración de suelo ($L=0,5$), recomendada para la mayoría de las condiciones ambientales, con el fin de mitigar los efectos de fondo en el cálculo de la vegetación (SCHEPERS et al., 2014; GARCÍA-LLAMAS et al., 2019)). Adicionalmente, se calcularon los índices dNBR y dNBR-EVI, debido a que suponen una mejora potencial de los índices tradicionales para evaluaciones iniciales de la severidad, debido a su sensibilidad mejorada a parámetros físicos o biofísicos (MILLER & THODE, 2007; FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2018). Estos índices se calcularon únicamente para el sensor Sentinel-2 MSI, ya que PlanetScope PSB.SD



no captura datos en las regiones de infrarrojo de onda corta (SWIR). Con el objetivo de posibilitar análisis comparativos entre satélites de diferente resolución espacial, los valores de los índices espectrales correspondientes a cada parcela CBI de 20 x 20 m se obtuvieron promediando los valores extraídos de los píxeles ráster utilizando una nube de 70 puntos dentro de cada parcela, muestreados aleatoriamente con un espaciamiento mínimo de 2 m, según el procedimiento descrito en Picotte y Robertson (2011).

Tabla 1. Índices espectrales (en negrita) evaluados y algoritmos de cálculo, utilizando las bandas espectrales Sentinel-2 MSI y PlanetScope.

Índices multispectrales	Ecuación Sentinel-2 MSI	Ecuación PlanetScope
NDVI	$(B8A - B4) / (B8A + B4)$	$(B8 - B6) / (B8A + B6)$
dNDVI	NDVIpre - NDVIpost	NDVIpre - NDVIpost
NDVIRE	$(B8A - B5) / (B8A + B5)$	$(B8 - B7) / (B8 + B7)$
dNDVIRE	NDVIREpre - NDVIREpost	NDVIREpre - NDVIREpost
GNDVI	$(B8A - B3) / (B8A + B3)$	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$
dGNDVI	GNDVIpre - GNDVIpost	GNDVIpre - GNDVIpost
EVI	$2.5 * [(B8A - B4) / (B8A + 6B4 - 7.5B2 + 1)]$	$2.5 * [(B8 - B6) / (B8 + 6B6 - 7.5B2 + 1)]$
dEVI	EVIpre - EVI _{post}	EVIpre - EVI _{post}
SAVI	$(1 + L) * [(B8A - B4) / (B8A + B4 + L)],$	$(1 + L) * [(B8 - B6) / (B8 + B6 + L)],$
	L = 0.5	L = 0.5
NBR	$(B8A - B12) / (B8A + B12)$	-
dNBR	1000 * (NBRpre - NBRpost)	-
dNBR-EVI	(dNBR - EVI _{post}) * 1000	-

3.5 Análisis de datos

Las correlaciones estadísticas entre la severidad estimada en campo mediante el CBI (variable dependiente) y los índices espectrales de teledetección derivados de cada satélite (variables independientes, Tabla 1) se estimaron ajustando modelos de máquina de vectores de soporte (SVM) de forma separada. Este algoritmo de aprendizaje automático permite detectar con precisión las relaciones no lineales y los patrones complejos existentes entre las variables espectrales predictoras y las mediciones de severidad en campo (TEHRANY et al., 2019). Los modelos SVM, configurados con una función de kernel (g) de base radial, fueron entrenados utilizando un esquema de validación cruzada tipo *Leave-One-Out* (LOOCV) para evaluar su rendimiento en condiciones de datos limitados y evitar el sobreajuste (DEBAENE et al., 2014). Los parámetros de coste (C) y función kernel (g) también se ajustaron a través de LOOCV para maximizar la precisión del modelo. El rendimiento de los modelos SVM se evaluó mediante métricas de precisión tras LOOCV (R^2_{cv}) y estadísticos de desviación como RMSE (raíz del error cuadrático medio).



Los valores de severidad del índice espectral con mejor rendimiento en los modelos SVM y el tipo de ecosistema se extrajeron mediante un muestreo aleatorio estratificado, generando un total de 3.000 puntos (separación ≥ 100 m), distribuidos proporcionalmente entre los dos incendios: $n= 2.200$ en Sierra de la Culebra y $n= 800$ en Coelemu. Como estratos para el muestreo, se consideraron los cinco tipos de ecosistemas dominantes presentes en ambos incendios. La distribución espacial de los ecosistemas previos al incendio dentro del perímetro de cada evento se determinó utilizando diferentes fuentes cartográficas. Para el incendio de la Sierra de la Culebra, se empleó el Mapa Forestal Nacional de España a escala 1:25.000 (MFNE25), desarrollado en coordinación con el cuarto Inventario Forestal Nacional de España (4-IFNE) (MTERD, 2022). En el caso del incendio de Coelemu, se utilizaron los datos de uso de suelo presentes en el Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile, elaborado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2015). Ajustamos un ANOVA de una vía y la posterior prueba HSD de Tukey para evaluar las diferencias de severidad en función del tipo de ecosistema y el incendio estudiado. La significación estadística se determinó al nivel de 0,05. Este modelo permitió identificar si las diferencias en severidad eran significativas entre las clases de cobertura y si estas variaban entre incendios ocurridos bajo diferentes contextos de gestión forestal. Todos los análisis estadísticos se implementaron en R (R CORE TEAM, 2024).

4. Resultados

De forma general, los algoritmos SVM mostraron un mayor nivel de precisión en la estimación de la severidad del fuego a partir de índices espectrales en el incendio de Coelemu que en el incendio de Sierra de la Culebra (Tabla 2). En ambos incendios, las métricas de teledetección basados en NBR (es decir, en bandas NIR y SWIR) derivados de Sentinel-2 MSI se ajustaron mejor a la severidad estimada en campo, siendo el índice dNBR-EVI el que presentó el mejor desempeño global ($R^2_{cv}=0,90$ y $0,82$, para Coelemu y Sierra de la Culebra, respectivamente). Para el sensor PlanetScope, el índice dNDVI mostró el mejor rendimiento ($R^2_{cv} = 0,86$) en el incendio de Coelemu, con una precisión muy similar a su análogo en Sentinel-2 MSI. Sin embargo, en el incendio de la Sierra de la Culebra, los modelos dNDVI basados en bandas de alta resolución espacial de PlanetScope presentaron un menor ajuste ($R^2_{cv}=0,43$) a la hora de estimar el impacto ecológico del fuego en comparación con Sentinel-2 MSI ($R^2_{cv}=0,57$).

Tabla 2. Precisión (R^2_{cv}) y error cuadrático medio (RMSE) de los modelos SVM entre los índices multiespectrales de teledetección derivados de los sensores Sentinel-2 MSI y PlanetScope y la severidad del fuego estimada mediante el CBI para cada uno de los incendios. El mejor modelo para cada imagen e incendio está resaltado en negrita.



Multispectral índices	Sentinel-2 MSI		PlanetScope					
	Coelemu (CHI)	Sierra de la Culebra (ESP)	Coelemu (CHI)	Sierra de la Culebra (ESP)				
	R ² cv	RMSE	R ² cv	RMSE	R ² cv	RMSE	R ² cv	RMSE
dNDVI	0.86	0.25	0.57	0.51	0.86	0.25	0.43	0.61
dNDVIRE	0.81	0.28	0.55	0.53	0.82	0.28	0.19	0.71
dGNDVI	0.56	0.43	0.53	0.54	0.80	0.29	0.37	0.67
dEVI	0.71	0.35	0.20	0.70	0.61	0.41	0.16	0.74
SAVI	0.66	0.39	0.75	0.39	0.29	0.57	0.42	0.60
dNBR	0.88	0.22	0.78	0.38	-	-	-	-
dNBR-EVI	0.90	0.21	0.82	0.34	-	-	-	-

Los mapas de severidad generados a partir del índice dNBR-EVI (Figura 2) ofrecieron una mayor diferenciación espacial y precisión en la caracterización de las áreas afectadas, particularmente en ecosistemas heterogéneos como los analizados en Sierra de la Culebra. Por el contrario, PlanetScope demostró eficacia en Coelemu, aunque sus limitaciones en términos de resolución espectral redujeron su rendimiento en paisajes más complejos, limitando una categorización adecuada de los niveles de impacto del fuego. Estos resultados destacan a Sentinel-2 MSI como el sensor más adecuado para estimar cuantitativamente la severidad del fuego en ambos incendios. Mediante este sensor, en el incendio de Coelemu se encontró un mayor porcentaje de superficie afectada por valores altos de severidad del fuego, fundamentalmente localizados en las grandes extensiones de pinares. Por otro lado, en la Sierra de la Culebra se encontró una mayor heterogeneidad en el impacto del fuego, con mayores extensiones afectadas por moderada y baja severidad.



Figura 2. Mapas de severidad en cada zona de estudio obtenidos utilizando el índice dNBR-EVI derivado de imágenes MSI de Sentinel-2 (izquierda), y el índice dNDVI derivado de imágenes PlanetScope (derecha).

Se evidenciaron diferencias significativas en los niveles de severidad entre los distintos tipos de ecosistemas y entre los incendios analizados ($p < 0,05$; Figura 3). En ambas zonas de estudio, los valores más altos de severidad se registraron en ecosistemas dominados por especies del género *Pinus*, con una severidad significativamente mayor en el incendio de Coelemu. Asimismo, se identificaron diferencias significativas en el comportamiento del fuego entre incendios en comunidades de bosque mixto, así como en áreas dominadas por cultivos o pastizales, donde el impacto del fuego fue significativamente menor. Por el contrario, no se encontraron diferencias significativas en la severidad del fuego entre las dos áreas de estudio en comunidades formadas por diferentes especies de frondosas nativas, ni entre diferentes tipos de matorrales.

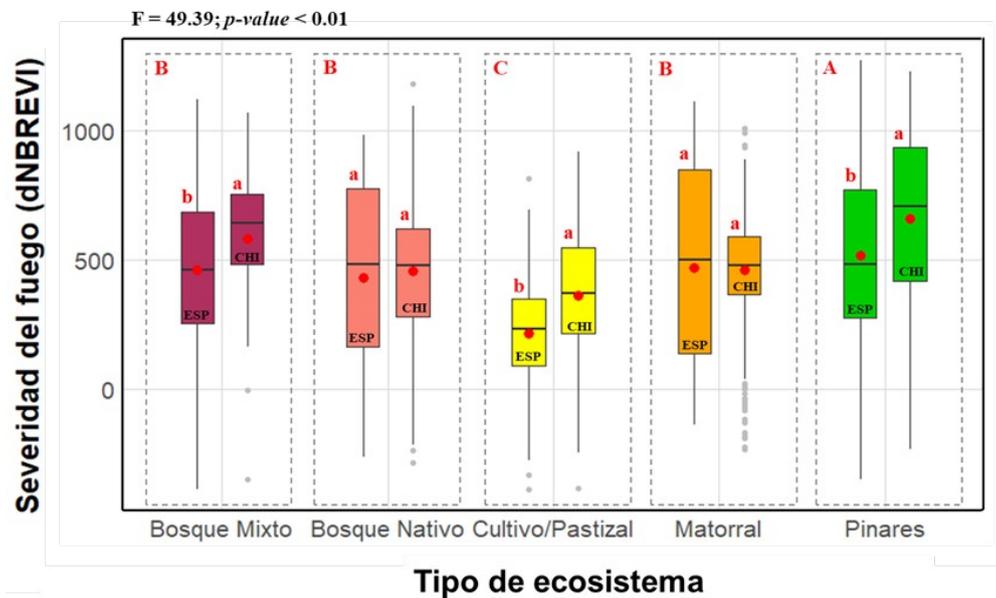


Figura 3. Diagramas de caja mostrando la relación entre los tipos de ecosistemas y la severidad del fuego estimada por el índice espectral dNBR-EVI del sensor Sentinel-2 MSI para los incendios de Coelemu (CHI) y Culebra (ESP). Incluimos resultados de ANOVA de la interacción ecosistema-incendio y resultados post-hoc de Tukey HSD por tipo de ecosistema. Las letras mayúsculas indican diferencias significativas en la severidad en el nivel 0,05 entre los tipos de ecosistemas y las letras minúsculas dentro de los ecosistemas entre los dos incendios bajo estudio.

5. Discusión

La distribución espacial de los ecosistemas en el paisaje y la resolución espectral de los sensores satelitales tuvieron una gran influencia en la capacidad para estimar y evaluar la alta variabilidad de los efectos ecológicos del fuego, la cual es característica de los incendios forestales ocurridos en contextos ambientales mediterráneos (NOLÈ et al., 2022). Nuestros resultados muestran que los patrones de correlación entre la severidad estimada en campo y los índices de teledetección variaron según el sensor empleado y el incendio estudiado.

Mientras que Sentinel-2 MSI, con índices que incorporan bandas NIR y SWIR, como el dNBR-EVI, mostró una alta capacidad para discriminar niveles de



severidad en paisajes heterogéneos, PlanetScope presenta grandes limitaciones en estos entornos, probablemente debido a su menor resolución espectral (HAMILTON et al., 2023). Estos hallazgos resaltan que los índices basados en bandas NIR y SWIR son más efectivos para capturar la variabilidad espacial de la severidad del fuego (VERAVERBEKE et al., 2011; FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2018). La alta sensibilidad de estos índices a la severidad ha sido ampliamente estudiada (p. ej. MILLER et al., 2009) y se debe a la disminución de la reflectancia en la banda NIR ocurrida por el cambio en la estructura celular de las hojas post-incendio, y al aumento simultáneo de la reflectancia SWIR relacionada principalmente con la disminución del contenido de humedad (VERAVERBEKE et al., 2011). Además, nuestros resultados coinciden con los obtenidos en estudios anteriores donde los índices dNBR y sus derivados produjeron altos ajustes de regresión y bajos errores predictivos tanto en áreas de una alta homogeneidad de los ecosistemas estudiados (MILLER & THODE 2007; FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2018), como en áreas más heterogéneas (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2023b).

Por otro lado, empleando el sensor PlanetScope, los índices derivados de bandas NIR y rojas, como el dNDVI, mostraron un mejor desempeño en paisajes más homogéneos como Coelemu en Chile, que en paisajes más complejos como el de la Sierra de la Culebra. A pesar de ello, estos índices mostraron una menor precisión general que los índices basados en SWIR. De todas formas, el buen desempeño de estos índices es prometedor ya que la región espectral del visible es la más común entre sensores y puede beneficiarse de las mejoras adicionales en términos de resolución espacial y temporal que ofrece PlanetScope (ANDREATA et al., 2022). Sin embargo, es notable que esta fuente de datos reduzca de forma tan significativa su rendimiento en áreas con mucha diversidad estructural en sus ecosistemas. En este sentido, las imágenes de PlanetScope, aunque se adquieren con una mayor frecuencia temporal que Sentinel-2 MSI y una resolución espacial mucho más fina, utilizan sensores espectrales con una calidad radiométrica relativamente más baja (HOUBORG & MCCABE, 2018), la cual ha demostrado ser fundamental para capturar la complejidad estructural de las comunidades vegetales en sistemas mediterráneos heterogéneos afectados por el fuego (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2023c). La posible fusión de datos de ambos sensores podría combinar las ventajas de la alta resolución espacial de PlanetScope con la alta resolución espectral de Sentinel-2 MSI, mejorando potencialmente la capacidad de índices como el dNDVI o dGNDVI de discriminar los impactos del fuego en diversos contextos ecológicos. Además, futuros estudios deberían explorar la contribución individual de cada banda espectral en estos sensores a los modelos predictivos y evaluar su importancia en diferentes escenarios afectados por el fuego.

En términos de patrones de severidad, en ambos incendios, los niveles más altos se concentraron en ecosistemas dominados por especies del género *Pinus*, destacando la inflamabilidad y la acumulación de biomasa característica de estas especies (VIEDMA et al., 2020). Sin embargo, la severidad fue significativamente mayor en Coelemu, lo que podría explicarse por varias razones. En primer lugar, los monocultivos de *Pinus radiata* D. Don en Coelemu presentan una alta continuidad horizontal y vertical del combustible, lo que pudo favorecer la propagación del fuego por extensas áreas y el desarrollo de severidades extremas (LEAL-MEDINA et al., 2024). Además, las condiciones climáticas más secas y cálidas de la zona central de Chile están aumentando el riesgo de ocurrencia de incendios de comportamiento extremo en sitios de alta productividad (LABBÉ et al., 2023), lo



que refuerza la importancia de considerar cambios en la edad de rotación de este tipo de plantaciones o de implantar medidas en el paisaje que disminuyan la peligrosidad. En este sentido, los resultados de nuestro estudio atribuyeron las severidades más bajas a áreas dominadas por vegetación nativa (p. ej. *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) y tierras agrícolas (fundamentalmente viñedos), las cuales podrían promover una menor acumulación y continuidad del combustible y, por lo tanto, actuar como atenuante de los efectos ecológicos más extremos del fuego (RABIN et al., 2015). Este efecto de la fragmentación del paisaje sobre la severidad se observa también en la Sierra de la Culebra, con ecosistemas distribuidos espacialmente de forma más heterogénea. La mayor presencia de bosques mixtos, así como de encinares (*Quercus ilex* L.) y robledales (*Quercus pyrenaica* Willd.), favorecieron la aparición de severidades bajas y moderadas, probablemente debido a su menor inflamabilidad y mayor capacidad para interrumpir la propagación del fuego (FERNANDES et al., 2010). Además, la gestión forestal más activa en esta región mediterránea, con prácticas como la reducción de combustible y la creación de un mayor número de cortafuegos, podría haber contribuido a una menor severidad del incendio. Estos hallazgos subrayan la necesidad de ajustar las estrategias de gestión y los modelos de evaluación de severidad tanto a las características específicas de cada ecosistema, como al contexto climático actual en toda la biorregión mediterránea (MORÁN-ORDÓÑEZ et al., 2020), el cual está favoreciendo la aparición de incendios de comportamiento extremo.

6. Conclusiones

Este estudio representa un enfoque novedoso que compara el rendimiento de varios índices de teledetección estimados en sensores con características espaciales y espectrales diferentes, como Sentinel-2 MSI y PlanetScope, para estimar la severidad del fuego referenciada en campo en ecosistemas mediterráneos totalmente diferentes en términos de distribución de sus comunidades vegetales. Sentinel-2 MSI, gracias a sus bandas SWIR y NIR, es más adecuado para evaluar la severidad del fuego en paisajes heterogéneos, mientras que PlanetScope mostró un desempeño suficientemente competitivo en paisajes homogéneos como las grandes extensiones de pinares del centro de Chile, donde se encontraron los niveles de severidad más altos. En contraste, una mayor fragmentación del paisaje y una mayor presencia de especies nativas favorecieron niveles de severidad más bajos. Nuestros resultados refuerzan la necesidad de fomentar una planificación del paisaje mediterráneo que incremente la fragmentación del combustible y promueva la presencia de vegetación nativa menos inflamable, lo cual podría reducir la severidad de futuros incendios.

7. Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER, UE) en el marco del proyecto LANDSUSFIRE (PID2022-139156OB-C21 y PID2022-139156OB-C22), dentro del Programa Nacional de Fomento de la Investigación Científico-Técnica (2021-2023), por el Gobierno del Principado de Asturias, a través del proyecto REWILDING (AYUD/2021/51261, con fondos FEDER); y por la Junta de Castilla y León en el marco del proyecto IA-FIREXTCyL (LE081P23).



8. Bibliografía

ANDREATTA, D., GIANELLE, D., SCOTTON, M., DALPONTE, M., 2022. Estimating grassland vegetation cover with remote sensing: A comparison between Landsat-8, Sentinel-2 and PlanetScope imagery. *Ecol. Indic.* 141, 109102.

BELTRÁN-MARCOS, D., SUÁREZ-SEOANE, S., FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M., AZEVEDO, J.C., CALVO, L., 2024. Fire regime attributes shape pre-fire vegetation characteristics controlling extreme fire behavior under different bioregions in Spain. *Fire Ecol.* 20, 1–22.

CERDA, R., GALLARDO-COBOS, R., SÁNCHEZ-ZAMORA, P., 2020. An Analysis of the Impact of Forest Policy on Rural Areas of Chile. *For.* 11, 1105–1111.

CONAF. Corporación Nacional Forestal. 2015. Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile: Sistema de Información Territorial SIT CONAF. Santiago, Chile. Disponible en: <https://sit.conaf.cl/>. Consultado el 10 de septiembre de 2024.

DEBAENE, G., NIEDŹWIECKI, J., PECIO, A., ZUREK, A., 2014. Effect of the number of calibration samples on the prediction of several soil properties at the farm-scale. *Geoderma* 214–215, 114–125.

DUARTE, E., RUBILAR, R., MATUS, F., GARRIDO-RUIZ, C., MERINO, C., SMITH-RAMIREZ, C., ABURTO, F., ROJAS, C., STEHR, A., DÖRNER, J., NÁJERA, F., BARRIENTOS, G., JOFRÉ, I., 2024. Drought and Wildfire Trends in Native Forests of South-Central Chile in the 21st Century. *Fire* 7, 230.

FERNANDES, P.M., LUZ, A., LOUREIRO, C., 2010. Changes in wildfire severity from maritime pine woodland to contiguous forest types in the mountains of northwestern Portugal. *For. Ecol. Manage.* 260, 883–892.

FERNÁNDEZ-GARCÍA, V., SANTAMARTA, M., FERNÁNDEZ-MANSO, A., QUINTANO, C., MARCOS, E., CALVO, L., 2018. Burn severity metrics in fire-prone pine ecosystems along a climatic gradient using Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 206, 205–217.

FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M., CALVO, L., SUÁREZ-SEOANE, S., 2020. Comparison of pixel unmixing models in the evaluation of post-fire forest resilience based on temporal series of satellite imagery at moderate and very high spatial resolution. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 164, 217–228.



FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M., FERNANDES, P.M., MARCOS, E., BELTRÁN-MARCOS, D., SARRICOLEA, P., FARRIS, M., CALVO, L., 2023a. Caution is needed across Mediterranean ecosystems when interpreting wall-to-wall fire severity estimates based on spectral indices. *For. Ecol. Manage.* 546, 121383.

FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M., CALVO, L., QUINTANO, C., FERNÁNDEZ-MANSO, A., FERNANDES, P.M., 2023b. Fractional vegetation cover ratio estimated from radiative transfer modeling outperforms spectral indices to assess fire severity in several Mediterranean plant communities. *Remote Sens. Environ.* 290, 113542.

FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M., SUÁREZ-SEOANE, S., CALVO, L., 2023c. Radar and multispectral remote sensing data accurately estimate vegetation vertical structure diversity as a fire resilience indicator. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 9, 117–132.

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.

FERNÁNDEZ-MANSO, A., QUINTANO, C., FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M., ROBERTS, D., 2024. Next-gen regional fire risk mapping: Integrating hyperspectral imagery and National Forest Inventory data to identify hot-spot wildland-urban interfaces. *Sci. Total Environ.* 940, 173568.

GARCÍA-LLAMAS, P., SUÁREZ-SEOANE, S., FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M., FERNÁNDEZ-GARCÍA, V., FERNÁNDEZ-MANSO, A., QUINTANO, C., TABOADA, A., MARCOS, E., CALVO, L., 2019. Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 80, 137–144.

HAMILTON, D., GIBSON, W., HARRIS, D., MCGATH, C., 2023. Evaluation of Multi-Spectral Band Efficacy for Mapping Wildland Fire Burn Severity from PlanetScope Imagery. *Remote Sens.* 15, 5196.

HEILMAYR, R., ECHEVERRÍA, C., LAMBIN, E.F., 2020. Impacts of Chilean forest subsidies on forest cover, carbon and biodiversity. *Nat. Sustain.* 2020 39 3, 701–709.

HOUBORG, R., MCCABE, M.F., 2018. A Cubesat enabled Spatio-Temporal Enhancement Method (CESTEM) utilizing Planet, Landsat and MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 209, 211–226.

HUERTA, S., MARCOS, E., FERNÁNDEZ-GARCÍA, V., CALVO, L., 2022. Short-term effects of burn severity on ecosystem multifunctionality in the northwest Iberian Peninsula. *Sci. Total Environ.* 844, 157193.

IGLESIAS, M.C., HERMOSO, V., CAMPOS, J.C., CARVALHO-SANTOS, C., FERNANDES,



P.M., FREITAS, T.R., HONRADO, J.P., SANTOS, J.A., SIL, Â., REGOS, A., AZEVEDO, J.C., 2022. Climate- and fire-smart landscape scenarios call for redesigning protection regimes to achieve multiple management goals. *J. Environ. Manage.* 322, 116045.

KEELEY, J.E., 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *Int. J. Wildl. Fire* 18, 116. <https://doi.org/10.1071/WF07049>

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. In: FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System (D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson and L.J. Gangi, Eds.), USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164, Ogden, UT, pp. CD:LA1–LA51.

LABBÉ, R., NIKLITSCHK, M., CONTRERAS, M., 2023. Effect of climate change on the land rent of radiata pine plantations in Chile: Site productivity and forest fires. *For. Policy Econ.* 156, 103068.

LANARAS, C., BIOUCAS-DIAS, J., GALLIANI, S., BALTSAVIAS, E., SCHINDLER, K., 2018. Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 146, 305–319.

LEAL-MEDINA, C., LOPATIN, J., CONTRERAS, A., GONZÁLEZ, M.E., GALLEGUILLOS, M., 2024. Post-fire *Pinus radiata* invasion in a threatened biodiversity hotspot forest: A multi-scale remote sensing assessment. *For. Ecol. Manage.* 561, 121861.

MILLER, J.D., SAFFORD, H.D., CRIMMINS, M., THODE, A.E., 2009. Quantitative evidence for increasing forest fire severity in the Sierra Nevada and southern Cascade Mountains, California and Nevada, USA. *Ecosystems* 12, 16–32.

MILLER, J.D., THODE, A.E., 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sens. Environ.* 109, 66–80.

MORÁN-ORDÓÑEZ, A., DUANE, A., GIL-TENA, A., DE CÁCERES, M., AQUILUÉ, N., GUERRA, C.A., GEIJZENDORFFER, I.R., FORTIN, M.J., BROTONS, L., 2020. Future impact of climate extremes in the Mediterranean: Soil erosion projections when fire and extreme rainfall meet. *L. Degrad. Dev.* 31, 3040–3054.

MTERD. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2022. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Madrid: Dirección General de Medio Natural y Política Forestal. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-forestal-nacional/cuarto_inventario.aspx. Consultado el 10 de septiembre de 2024.



NOLÈ, A., RITA, A., SPATOLA, M.F., BORGHETTI, M., 2022. Biogeographic variability in wildfire severity and post-fire vegetation recovery across the European forests via remote sensing-derived spectral metrics. *Sci. Total Environ.* 823, 153807.

PICOTTE, J.J., ROBERTSON, K.M., 2011. Validation of remote sensing of burn severity in south-eastern US ecosystems. *Int. J. Wildl. Fire* 20, 453.

R CORE TEAM. 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Viena, Austria, 2024; Disponible en línea: <https://www.R-project.org/> (Consultado el 15 de noviembre de 2024).

RABIN, S.S., MAGI, B.I., SHEVLIKOVA, E., PACALA, S.W., 2015. Quantifying regional, time-varying effects of cropland and pasture on vegetation fire. *Biogeosciences* 12, 6591–6604.

RODRIGUES, M., CUNILL CAMPRUBÍ, À., BALAGUER-ROMANO, R., COCO MEGÍA, C.J., CASTAÑARES, F., RUFFAULT, J., FERNANDES, P.M., RESCO DE DIOS, V., 2023. Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe. *Sci. Total Environ.* 859, 160320.

SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DURRANT, T., BOCA, R., MAIANTI, P., LASTNAMELIBERTÀ, G., OOM, D., BRANCO, A., DE RIGO, D., FERRARI, D., ROGLIA, E., SCIONTI, N., 2023. Advance Report on Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2022. *Publ. Off. Eur. Union*, Luxemb. 1–54.

SCHEPERS, L., HAEST, B., VERAVERBEKE, S., SPANHOVE, T., BORRE, J. VANDEN, GOOSSENS, R., 2014. Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in Belgium using airborne imaging spectroscopy (APEX). *Remote Sens.* 6, 1803–1826.

TEDIM, F., LEONE, V., AMRAOUI, M., BOUILLON, C., COUGHLAN, M.R., DELOGU, G.M., FERNANDES, P.M., FERREIRA, C., MCCAFFREY, S., MCGEE, T.K., PARENTE, J., PATON, D., PEREIRA, M.G., RIBEIRO, L.M., VIEGAS, D.X., XANTHOPOULOS, G., 2018. Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts. *Fire* 2018, Vol. 1, Page 9 1, 9.

TEHRANY, M.S., JONES, S., SHABANI, F., MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, F., TIEN BUI, D., 2019. A novel ensemble modeling approach for the spatial prediction of tropical forest fire susceptibility using LogitBoost machine learning classifier and multi-source geospatial data. *Theor. Appl. Climatol.* 137, 637–653.

VERAVERBEKE, S., LHERMITTE, S., VERSTRAETEN, W.W., GOOSSENS, R., 2011. Evaluation of pre/post-fire differenced spectral indices for assessing burn severity



in a mediterranean environment with landsat thematic mapper. *Int. J. Remote Sens.* 32, 3521–3537.

VIEDMA, O., CHICO, F., FERNÁNDEZ, J.J., MADRIGAL, C., SAFFORD, H.D., MORENO, J.M., 2020. Disentangling the role of prefire vegetation vs. burning conditions on fire severity in a large forest fire in SE Spain. *Remote Sens. Environ.* 247, 111891.