

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

Delegido, J.*¹, Pezzola, A.², Casella, A.³, Winschel, C.², Urrego, E. P.¹, Jiménez, J. C.¹, Soria, G.¹, Sobrino, J. A.¹, Moreno, J.¹

¹ Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universitat de València. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna, Valencia, España.

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Laboratorio de Teledetección y SIG. Estación Experimental Agropecuaria - Hilario Ascasubi. Buenos Aires, Argentina.

³ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Observatorio Permanente de los Agroecosistemas. Instituto de Clima y Agua. INTA-Castelar. Buenos Aires, Argentina.

Resumen: Conocer la severidad de los incendios rurales es imprescindible para evaluar daños y analizar los procesos de recuperación en forma económica y eficaz. Entre diciembre de 2016 y enero de 2017 se quemaron más de 30.000 km² de arbustos y pastizales en Argentina. El incendio estudiado en este trabajo, localizado en el sur de la provincia de Buenos Aires, corresponde a una zona semiárida con predominio de arbustales xerófilos y pastizales, siendo este ecosistema muy abundante en la zona centro y sur de Argentina. A partir de campañas de campo en el área afectada por este incendio, se georreferenciaron zonas quemadas y se caracterizó la severidad del fuego en 5 niveles. El objetivo de este trabajo es analizar la potencialidad de los nuevos satélites Sentinel-2 para el estudio de incendios, comparándolo con Landsat-8, pues esta misión ha sido una de las más usadas en ello. A partir de imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 antes y después del incendio, se han analizado todas las posibles combinaciones de bandas de ambos satélites en índices espectrales de diferencia normalizada (NDSI), así como la diferencia de esos valores antes y después del incendio (dNDSI). Los resultados muestran una significativa correlación ($R^2=0,72$ y error de estimación de 0,77) del dNDSI obtenido con Sentinel-2 con los niveles de severidad obtenidos en la campaña de campo usando las bandas 8a y 12 (del NIR y del SWIR), que coinciden con las bandas del *Normalized Burn Ratio* (NBR) mejorando respecto a Landsat-8 ($R^2=0,63$ y error de estimación de 0,92). Además se observa que la correlación mejora todavía más usando las bandas 6 y 5 de Sentinel-2 localizadas en la región del *Red-Edge* ($R^2=0,74$ y error de estimación de 0,76). Se ha observado una correlación inversa entre la recuperación de la vegetación cuatro meses después del incendio y el nivel de severidad del incendio.

Palabras clave: Severidad de incendios, Sentinel-2, Landsat-8, dNBR, dNDSI.

Fire severity estimation in southern of the Buenos Aires province, Argentina, using Sentinel-2 and its comparison with Landsat-8

Abstract: Assessment of rural fire severity is fundamental to evaluate fire damages and to analyze recovery processes in a low-cost and efficient way. Burnt areas covering shrubs and grasslands were estimated in more than 30,000 km² in Argentina from December 2016 to January 2017. The study area presented in this work is located in the South of the

To cite this article: Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E. P., Jiménez, J. C., Soria, G., Sobrino, J. A., Moreno, J. 2018. Fire severity estimation in southern of the Buenos Aires province, Argentina, using Sentinel-2 and its comparison with Landsat-8. *Revista de Teledetección*, 51, 47-60. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8934>

* Corresponding author: Jesus.Delegido@uv.es

Buenos Aires province, and it covers a semiarid area with the presence of xerophilous shrubs and grasslands. This is one of the most abundant ecosystem in Central and Southern Argentina. Field campaigns were carried out over the area affected by the fire in order to georeference the burnt plots and characterized the fire severity in 5 levels. The objective of this work is to analyze the feasibility of new satellites Sentinel-2 for fire studies, as well as provide a comparison to Landsat-8 derived results, because this mission has been one of the most used in it. Pre-fire and post-fire Sentinel-2 and Landsat-8 imagery were used to analyze different band combinations to compute a Normalized Difference Spectral Index (NDSI), as well as the difference of this index before and after the fire (dNDSI). Results show a significant correlation ($R^2=0.72$ and estimation error of 0.77) between dNDSI derived from Sentinel-2 and the severity levels obtained in the field campaign using bands 8a and 12 (NIR and SWIR), the same bands as used in the Normalized Burn Ratio (NBR). Moreover, results derived from Sentinel-2 are better than results derived from Landsat-8 ($R^2=0.63$ and estimation error of 0.92). Furthermore, it is observed that the correlation is improved when Sentinel-2 bands 6 and 5 (located in the Red-Edge region) are considered ($R^2=0.74$ and estimation error of 0.76). An inverse correlation has been observed between the recovery of vegetation four months after the fire and the fire severity level.

Key words: Burn severity, Sentinel-2, Landsat-8, dNBR, dNDSI.

1. Introducción

Los incendios rurales son causa de importantes pérdidas tanto económicas como medioambientales, pues además de modificar o destruir ecosistemas tienen un importante efecto en el aporte de carbono a la atmósfera (Chuvieco *et al.*, 2006; Van Der Werf *et al.*, 2017). En la República Argentina ocurrieron una serie de incendios de gran magnitud entre diciembre de 2016 y enero de 2017, quemando más de 30.000 km² de arbustos y pastizales. La sucesión de periodos húmedos seguidos de sequía con tormentas eléctricas, sumando la acción del hombre, dieron lugar a incendios de proporciones catastróficas. Las regiones afectadas abarcaron sectores del SO bonaerense, NE de Río Negro y SE de La Pampa. En estos ecosistemas áridos y semiáridos el fuego es un elemento modelador del paisaje y se presenta periódicamente con distinta intensidad, modificando el balance entre pastos y arbustos, dado por complejas interacciones entre factores como el contenido de humedad, tipo de suelo, pastoreo (manejo) y fuego (Delegido *et al.*, 2017; Bran *et al.*, 2007). La magnitud de la mayoría de los efectos del fuego está relacionada con la condición de uso previo de la parcela (por ejemplo, si el terreno fue destinado al pastoreo o para la extracción de leña como combustible), con la acumulación de materia seca, densidad y tamaño de especies leñosas, la acumulación de combustible fino previo al incendio así como con las condiciones ambientales en el momento del siniestro (Vanzolini *et al.*, 2017). En gran parte de la región, la alta densidad de los arbustos ofrece

dificultad para que el ganado pueda acceder a consumir el forraje provisto por el pastizal natural (Kröpfl *et al.*, 2005), lo que produce un aumento del material combustible.

La caracterización del régimen de fuego, a través de su frecuencia y severidad, describe los efectos directos sobre el agro-ecosistema y permite apreciar la variabilidad temporal y espacial en una determinada región. Conocer la relación entre la severidad de un incendio y su posterior regeneración puede ayudar a la toma de decisiones en cuanto a la gestión del terreno quemado (Martínez *et al.*, 2017; Botella-Martínez y Fernández-Manso, 2017). La estimación de la gravedad de la quema se puede realizar empleando diferentes enfoques. Los métodos utilizados para medir la severidad de los incendios están estrechamente vinculados a los objetivos perseguidos, que pueden incluir una evaluación de la recuperación de la vegetación, el potencial de erosión del suelo o la fragmentación del paisaje (Key y Benson, 2005; Botella-Martínez y Fernández-Manso, 2017).

Las áreas totalmente quemadas generalmente tienen una reflectancia espectral distintiva frente a las no perturbadas, pero la mayoría de los estudios han encontrado que es problemático discriminar los valores de severidad intermedia. En las últimas décadas se ha venido utilizando la teledetección para el estudio de los incendios, no solo para su evaluación sino también para los procesos de recuperación post fuego (González-Alonso *et al.*, 2007). Muchos de estos estudios usan índices espectrales obtenidos por medio de diferentes

combinaciones de bandas (Montorio *et al.*, 2014). El *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) ha sido uno de los índices más utilizados por la relación que muestra entre el área incendiada y la disminución en la cubierta vegetal (Chuvieco, 2002; Chuvieco *et al.*, 2006; Diaz-Delgado *et al.*, 2003, De Santis y Chuvieco, 2007, Escuin *et al.*, 2008). Durante los últimos años también se ha empleado, con resultados más robustos, para la estimación del grado de severidad de los incendios el *Normalized Burn Ratio* (NBR) (López-García y Caselles, 1991; Key y Benson, 2005; Chuvieco *et al.*, 2006; De Santis y Chuvieco, 2007) que combina las dos bandas espectrales que responden mejor y de manera más contrastada al efecto del fuego: el NIR cuya reflectividad desciende debido a la desaparición de la vegetación activa y el SWIR, en el que aumenta la reflectividad por la pérdida de humedad, mayor exposición del suelo y menores sombras proyectadas por la vegetación (Escuin *et al.*, 2008; Chuvieco, 2002). El NBR se calcula mediante la ecuación 1:

$$NBR = (R_{NIR} - R_{SWIR}) / (R_{NIR} + R_{SWIR}) \quad (1)$$

donde R_{NIR} es la reflectividad en la banda NIR y R_{SWIR} es la reflectividad en la banda del SWIR.

Diferentes autores han propuesto y usado estos y otros índices y diferentes técnicas en teledetección (Fernández-Manso *et al.*, 2016; Chuvieco, 2002; Roldán-Zamarrón *et al.*, 2006) que han sido aplicadas con distintos sensores y satélites, como MODIS y Landsat principalmente. El lanzamiento de la nueva misión Sentinel-2 de la ESA abre nuevas perspectivas en el estudio de incendios debido a su calidad espectral, radiométrica, su alta resolución espacial y su tiempo de revisita. Por ello, diferentes publicaciones muestran el potencial de su uso en estudios de incendios (Fernández-Manso *et al.*, 2017; Quintano *et al.*, 2018) destacando el interés de las nuevas bandas de Sentinel-2 en el *Red-Edge* (Fernández-Manso *et al.*, 2016; Navarro *et al.*, 2017).

El objetivo de este trabajo es analizar si existe una mejora en la estimación de la severidad de incendios usando Sentinel-2 y cuantificándola respecto a Landsat-8, para los ecosistemas naturales afectados por los incendios ocurridos en diciembre de 2016 en el sur de la provincia de Buenos Aires de Argentina, así como desarrollar una metodología

para estimar el grado de severidad en incendios para este ecosistema, tan abundante en Argentina.

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio

El área en estudio abarca un sector del sur de la provincia de Buenos Aires de la República Argentina, circunscrita dentro del partido de Patagones con coordenadas centrales en $-39^{\circ} 34' 50''$ y $-62^{\circ} 46' 17''$ DATUM WGS84 (Figura 1).

El sur bonaerense se encuentra dentro de la inmensa llanura pampeana que presenta condiciones naturales homogéneas sin fuertes contrastes en su topografía, pero con grandes diferencias climáticas, que se refleja en una progresiva aridez alcanzando rasgos netamente patagónicos en las proximidades del río Negro. Desde el punto de vista climático es una zona semiárida, caracterizada por una precipitación anual menor de 500 mm, con valores anuales de temperatura entre los 14 y 20°C y con estaciones térmicas bien diferenciadas: veranos e inviernos rigurosos y primaveras y otoños intermedios. Durante los meses estivales, de diciembre a febrero, es frecuente la ocurrencia de grandes incendios, en su mayoría producidos por el hombre y también causados por tormentas con descargas eléctricas que hacen que la vegetación que se encuentra seca o con elevado estrés hídrico se encienda y se queme (Nicora, 2014).

En cuanto a su fitogeografía, la ecoregión está ubicada dentro de una zona de transición (ecotono), en la región denominada provincia del Espinal distrito del Caldén (Figura 2) con una superficie de 268.506 km² y la provincia del Monte con 463.402 km² (Cabrera, 1951). La vegetación es de tipo xerófila; fisonómicamente se corresponde con un matorral abierto de tipo achaparrado con arbustos que alcanzan 1,5 a 3 m de altura, entre los cuales se desarrolla una estepa herbácea de escasa cobertura con predominio de gramíneas bajas (Lamberto, 1987). La densidad de arbustos es variable, por lo general de 0,5-1 plantas por m². En el caso de islas de chañar puras (*Geoffroea decorticans*) se llega a 2 o 3 plantas/m² (Casas *et al.*, 1978). Se encuentra también como dominante la Jarilla (*Larrea divaricata*), matorro negro (*Cyclolepis genistoides*) y uña de gato

(*Chuquiraga erinacea*). En el estrato herbáceo predominan las gramíneas y poas, siendo las especies más comunes: cebadilla pampeana (*Bromus brevis*), flechilla fina (*Stipa tenuis*), flechilla grande (*Stipa clarazii*), flechilla negra (*Piptochaetium napostaense*), pasto hilo (*Poa lanuginosa*), paja vizcachera (*Stipa ambigua*, *Stipa tenuissima*) y pasto puna (*Stipa trichotoma*), con menor valor forrajero aunque también hay oferta forrajera en especies anuales como dicotiledóneas o gramíneas (Cecchi et al., 2006). Estas son las principales especies de los ecosistemas naturales en las provincias del Espinal y Monte, de ahí la importancia de disponer de una metodología calibrada para este ecosistema que permita determinar el grado de severidad de los incendios por teledetección (Delegido et al., 2017).



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

A finales de 2016 y principios de 2017 se dieron una serie de incendios en la zona centro-sur de Argentina (Figura 2) entre ellos el que ocurrió en la zona seleccionada como zona piloto. El incendio en este sector específico, tomado como zona test en este trabajo, se produjo el 22 de diciembre de 2016 y se muestra en la Figura 3. Este incendio se dio cerca de la población de Villalonga (departamento de Patagones) y afectó a una superficie de 8800 ha, cuya coordenada central es 40° 01' 51" de latitud sur y 62° 53' 11" de longitud oeste DATUM WGS84 (Figura 3).

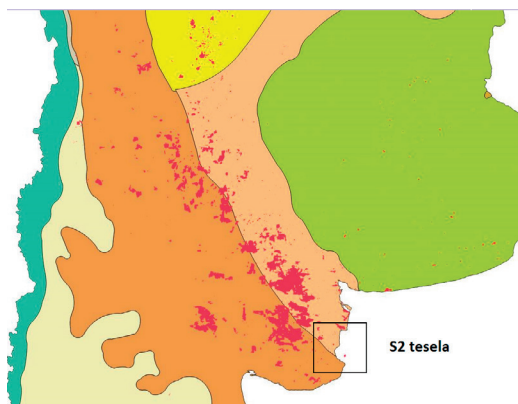
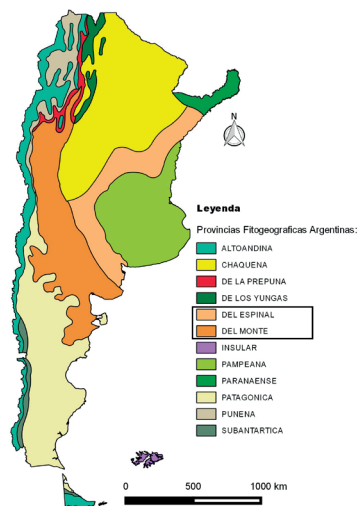


Figura 2. Zonas fitogeográficas argentinas (arriba) (Cabre-ra, 1951) y áreas siniestradas por diferentes incendios entre noviembre del 2016 y marzo 2017 (abajo). En el recuadro se muestra el área que abarca la tesela de la imagen Sentinel-2 de la zona en estudio.

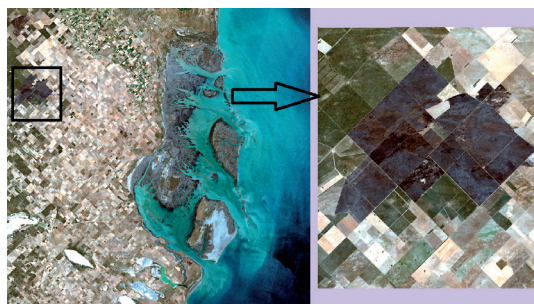


Figura 3. RGB de la imagen Sentinel-2 con las bandas 4, 3 y 2 (zona recuadro de la Figura 2) del 28 de diciembre de 2016 con ampliación del incendio del 22 de diciembre.

2.2. Imágenes y procesamiento

La misión Sentinel-2 (S2) de la ESA, es una constelación de dos satélites: S2A lanzado el 23 de junio de 2015 y S2B lanzado el 7 de marzo de 2017. Cada satélite lleva un sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) que cubre 13 bandas con resolución espacial de 10, 20 y 60 m (ESA, 2017). En la Tabla 1 se muestra la información más relevante sobre las bandas MSI. Para utilizar la metodología de estudios de incendios propuesta por Key y Benson (2005), que incluye la información obtenida de dos imágenes justo antes y después del incendio, se seleccionaron las imágenes del satélite S2A del 18 de diciembre de 2016 (pre-incendio) y del 28 de diciembre de 2016 (post-incendio) corregidas atmosféricamente mediante el módulo Sen2Cor (*Sentinel-2 atmospheric correction*) de la *toolbox* libre SNAP (*Sentinel Application Platform*) desarrollado por la ESA. También con SNAP se hizo el remuestreo de todas las bandas de las imágenes a 10 m de resolución espacial.

El satélite Landsat-8 (L8), de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y el United States Geological Survey (USGS) fue lanzado en Febrero de 2013 como continuación de la misión Landsat (NASA, 2017). En la Tabla 1 se muestran sus características espectrales. Para este trabajo se seleccionaron dos imágenes L8 de la zona del incendio: 15 de diciembre de 2016 (pre-incendio) y 07 de enero de 2017 (post-incendio) que fueron obtenidas en forma gratuita en valores de reflectividad, a través de la página del USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

2.3. Índices espectrales analizados

Diferentes índices espectrales para el estudio de los incendios por teledetección, como el NDVI, el NBR y muchos otros (Navarro *et al.*, 2017; Fernández-Manso *et al.*, 2016), usan formulaciones matemáticas similares, es decir, una resta entre la reflectividad en dos bandas dividida por la suma de la reflectividad en esas mismas dos bandas. Genéricamente podemos denominarlos índices espectrales de diferencia normalizada (NDSI) (Chuvieco *et al.*, 2006) y se diferencian entre ellos por diferentes combinaciones de bandas en su formulación (Fernández-Manso *et al.*, 2016).

Siguiendo el método propuesto por Key y Benson (2005) se calculó los NDSI de la imagen anterior (NDSIpre) y posterior al incendio (NDSIpost), combinando todas las bandas de Sentinel-2, con el objetivo de encontrar la combinación de bandas que proporciona mejores resultados. Por otro lado se repitió la operación con todas las bandas del satélite L8. Una vez calculados, se procedió a estimar la diferencia entre ambos índices como muestra la ecuación 2:

$$dNDSI = NDSI_{pre} - NDSI_{post} \quad (2)$$

Estos índices se han asignado a las observaciones del grado de severidad observado en el campo.

2.4. Estimación de la severidad. Trabajo de campo

Hacer una evaluación en campo del daño causado por un incendio no es fácil (González-Alonso *et al.*, 2007) por lo que se han propuesto varios

Tabla 1. Información espectral y resolución espacial de las bandas Sentinel-2 (ESA, 2017) y Landsat-8 (NASA, 2017).

Bandas	Sentinel 2				Landsat-8 OLI y TIRS			
	Función	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución Espacial (m)	Función	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución Espacial (m)
1	Aerosol costero	443.9	27	60	Aerosol costero	442.96	15.98	30
2	Azul	496.6	98	10	Azul	482.04	60.04	30
3	Verde	560	45	10	Verde	561.41	57.33	30
4	Rojo	664.5	38	10	Rojo	654.59	37.47	30
5	Infrarrojo cercano - NIR	703.9	19	20	Infrarrojo cercano - NIR	864.67	28.25	30
6	Infrarrojo cercano - NIR	740.2	18	20	SWIR-1	1608.86	84.72	30
7	Infrarrojo cercano - NIR	782.5	28	20	SWIR-2	2200.73	186.66	30
8	NIR	835.1	145	10	Panromático	598.5	172.4	15
8a	Infrarrojo cercano - NIR	864.8	33	20	-	-	-	-
9	Vapor de agua	945	26	60	Cirrus	1373.43	20.39	30
10	Cirrus - SWIR	1373.5	75	60	Infrarrojo térmico - TIR-1	10900	588	100
11	SWIR	1613.7	143	20	Infrarrojo térmico - TIR-2	12000	1011	100
12	SWIR	2202.4	242	20	-	-	-	-

métodos para la medición en el campo de la severidad de incendios (Chuvieco *et al.*, 2006) siendo el más reciente el proyecto FIREMON del Servicio Forestal De los Estados Unidos, basado en datos de campo e imágenes de sensores remotos. En este proyecto el *Composit Burn Index* (CBI) se propuso como un método de campo para evaluar la gravedad de los incendios (Key y Benson, 2005; Cocke *et al.*, 2005). El CBI proporciona un índice de gravedad semicuantitativo, en lugar de utilizar rangos cualitativos (alto, medio, bajo), comúnmente adoptado por otros autores. Esta clasificación numérica facilita la validación estadística de las estimaciones derivadas de datos cuantitativos de sensores remotos. El CBI se basa en la evaluación de diferentes variables asociadas con efectos del fuego en diferentes estratos del sitio. Las observaciones se pueden realizar de forma simple en el campo y por lo tanto, el índice se puede calcular con la rapidez suficiente para cubrir una gran cantidad de parcelas con poco esfuerzo y obtener información de grandes superficies. Se evalúan cinco estratos de vegetación: A, sustrato (material tendido en el suelo); B, hierbas, arbustos cortos y árboles pequeños (<1 m de altura); C, arbustos altos y árboles jóvenes (<5 m de alto); D, árboles intermedios (5-20 m de altura); y E, árboles grandes (>20 m de altura). El CBI final para cada parcela es el promedio de todos los estratos, si están presentes en esa parcela, o de lo contrario, el promedio de los estratos presentes. El valor de CBI de cada estrato se estima después de la inspección visual considerando diferentes variables: porcentaje de follaje consumido, de especies vivientes/rebrotaadas, de cobertura de cada estrato, disposición de las cenizas en el suelo, diámetro de ramas no quemadas y quemadas, entre otras (Ghermandi *et al.*, 2013).

Durante el día 18/02/2017 (dos meses después del incendio) se realizó la campaña de observación de campo en la zona afectada por el incendio, en la que se tomaron datos de un total de 51 sitios: no quemados (13) y quemados (38). Debido a las bajas precipitaciones ocurridas durante el periodo transcurrido desde el incendio, las altas temperaturas estivales y la permanencia de otros focos de fuego en toda la región, no se produjo la natural regeneración de especies por nacimiento (González, 2002; 2011) o rebrote, por lo que se observó un crecimiento apenas incipiente de

vegetación anual, no superando los 5 o 10 cm de altura. Se clasificó visualmente, tomando como referencia una superficie uniforme de 20×20 m. El tamaño de parcela se tomó en relación a la accesibilidad y homogeneidad presentes en el paisaje siniestrado. Cada punto dista entre sí al menos 150 m, en línea recta, intentando abarcar zonas de muy diferente grado de afectación. Los puntos fueron georeferenciados y clasificados con una escala del 1 al 5, adaptando la metodología de Key y Benson (2005) para ecosistemas con predominio de vegetación arbustiva, por lo que se consideró necesario incrementar la graduación para poder cuantificar los distintos niveles de afectaciones del estrato herbáceo. Los niveles de severidad (NS) fueron: 1=no quemado, 2=leve, 3=leve a moderado, 4=moderado a severo, 5=severo. Los criterios que se tuvieron en cuenta para la selección de dichos niveles fueron: a) en suelo, coloración, presencia de cenizas y su distribución, estado de degradación; b) en estrato herbáceo: presencia / ausencia de vegetación con su correspondiente porcentaje de cobertura; c) en estrato arbustivo: presencia y ausencia de hojas, diámetro de ramas quemadas, altura y fuste (Key y Benson, 2005). Las estimaciones de cobertura se realizaron en forma visual de acuerdo a la siguiente escala (adaptación de Bran *et al.*, 2007): C1 (NS=5): 0% de cobertura; C2 (NS=4): 1 a 30%; C3 (NS=3): 31-50%. C4 (NS=2): 51-80% y C5 (NS=1) de 80-100% (Figura 4). En la Figura 5 se muestran ejemplos de diferentes niveles de severidad obtenidas en la zona en estudio.

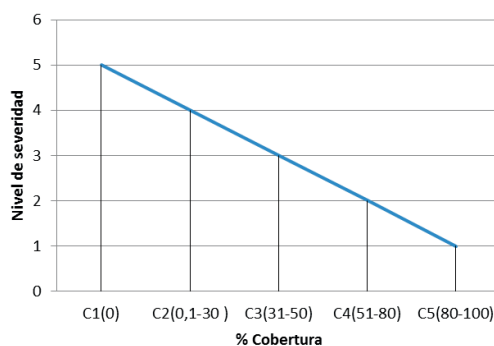


Figura 4. Relación entre el Nivel de severidad y el porcentaje de cobertura del suelo.

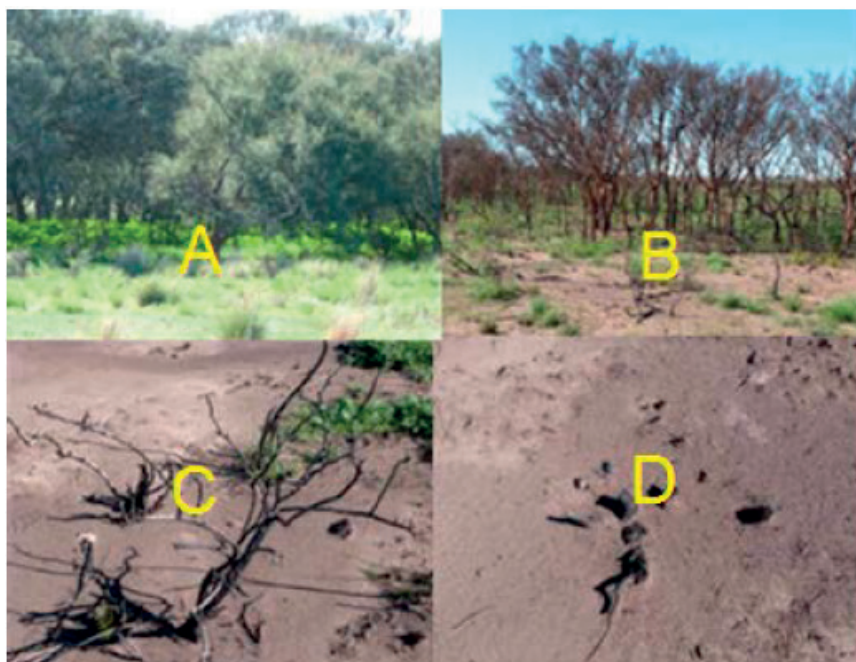


Figura 5. Imagen A: NS=1; Imagen B: NS=3; Imagen C: NS=4; Imagen D: NS=5.

2.5. Elaboración del mapa de nivel de severidad del incendio y análisis de la recuperación de la vegetación

A partir de los 51 puntos georreferenciados del muestreo, se han extraído los espectros de reflectividad de las imágenes S2 y L8 antes y después del incendio. Combinando entre sí todas las bandas de S2 por un lado y las de L8 por otro lado, se han calculado todas las combinaciones del índice dNDSI según la ecuación (2). Se ha calculado el coeficiente de determinación R^2 para un ajuste lineal de los diferentes índices dNDSI con el nivel de severidad obtenido en campo, así como el error de estimación. Con ello se han seleccionado las mejores combinaciones de bandas (mejor R^2 y menor error de estimación) y se han calculado los ajustes lineales entre el NS y el dNDSI. Estas ecuaciones se han aplicado a las imágenes S2 y L8 y se han elaborado los mapas de NS.

Con el objetivo de comprobar el potencial de la metodología desarrollada, se ha hecho un análisis estadístico comparando los valores del NS con algún parámetro relacionado con la densidad de vegetación después del incendio, para analizar la

influencia del NS en la capacidad de recuperación de la vegetación transcurridos varios meses del fuego. Para ello, se ha escogido el parámetro biofísico que proporciona la cantidad de vegetación por unidad de suelo: el índice de área foliar, conocido por LAI por sus iniciales en inglés (Delegido *et al.*, 2016). Usando la metodología desarrollada en Delegido *et al.* (2013) se ha calculado el LAI en una imagen Sentinel-2 corregida atmosféricamente con Sen2cor del 17 de abril de 2017 (4 meses después del incendio). Posteriormente, a partir de un Scatter Plot realizado entre el mapa de NS obtenido inmediatamente después del incendio y el mapa de LAI obtenido 4 meses después del incendio, se ha hecho un análisis con el fin de observar si existe relación entre ambos parámetros.

3. Resultados

En la Tabla 2 se muestran las 8 mejores combinaciones de bandas de S2 ordenadas según el coeficiente de determinación R^2 , junto a la mejor correlación obtenida con las bandas de L8. Para todas ellas el coeficiente p fue muy inferior a 0,001, por lo que todas ellas se consideran

Tabla 2. Coeficiente de determinación (R^2), error de estimación y ecuación de las correlaciones entre nivel de severidad y los diferentes índices dNDSI (x) de S2 y L8.

Sentinel-2			
Bandas	R^2	Error	Ecuación
6 - 5	0,719	0,78	NS=16,693 x + 0,7563
8a - 5	0,702	0,81	NS=16,628 x + 0,2137
7 - 5	0,691	0,82	NS=16,018 x + 0,5083
6 - 2	0,690	0,83	NS=9,6658 x - 0,0948
6 - 4	0,683	0,83	NS=9,0271 x + 0,8626
8 - 4	0,680	0,84	NS=9,7271 x + 0,4132
6 - 3	0,679	0,84	NS=11,096 x + 0,4195
8a - 12	0,670	0,85	NS=9,2163 x - 1,1766
Landsat-8			
5 - 6	0,5838	0,97	NS=9,2677 x - 1,49

estadísticamente significativas. El orden en que se muestran las bandas en la tabla corresponde al orden de las bandas en la fórmula que proporcionan correlación positiva (por ejemplo, las bandas 6-5 indican que el índice $NDSI=(b6-b5)/(b6+b5)$). En dicha tabla se observa que la mejor correlación se obtiene con las bandas 6 y 5 de S2 (centradas en 740 y 705 nm) correspondiente al *Red-Edge*, y que la primera combinación que aparece con buena correlación usando las clásicas bandas del índice NBR (NIR y SWIR) se obtiene con las bandas 8a y 12 (865 y 2190 nm). Incluso en este caso, la correlación es mejor que la obtenida con L8 usando las clásicas bandas del índice NBR: la 5 (NIR) y 6 (SWIR). En las Figuras 6, 7 y 8 se muestran las representaciones gráficas del nivel de severidad con la mejor combinación de bandas de L8, la mejor de S2 y la combinación 8a y 12 de S2 del clásico NBR.

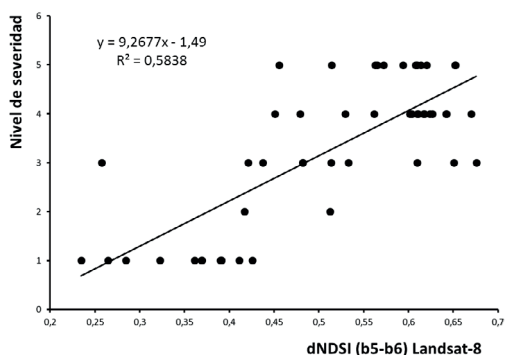


Figura 6. Nivel de severidad en función del dNDSI con las bandas 5 y 6 de Landsat-8.

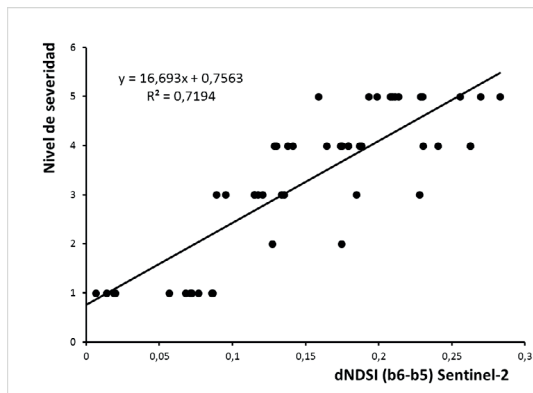


Figura 7. Nivel de severidad en función del dNDSI con las bandas 6 y 5 de Sentinel-2.

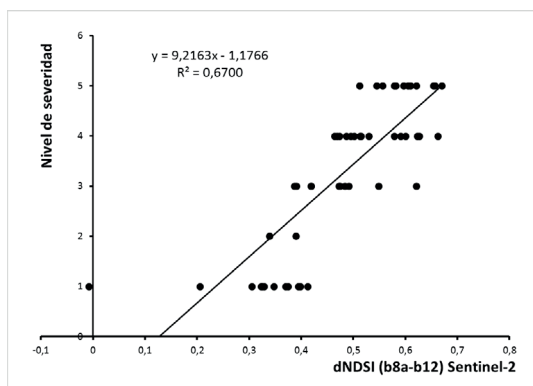


Figura 8. Nivel de severidad en función del dNDSI con las bandas 8a y 12 de Sentinel-2.

Sin embargo, en las Figuras 6 y 8 se observa claramente un punto alejado de la nube de puntos que al eliminarlo mejorará la correlación lineal. Con el objetivo de analizar en detalle este hecho, hemos calculado el coeficiente de determinación R^2 y el error de estimación de todas las posibles combinaciones de bandas eliminado cada vez una punto de los 51. En la Figura 9 se muestra el resultado para las combinaciones de las bandas 6 - 5 y 8a - 12 de Sentinel-2 y 5 - 6 de Landsat-8. Las gráficas de error de estimación son similares pero inversas a estas, por lo que no se muestran.

En la Figura 9 se observa que para la combinación de bandas 6 y 5 de Sentinel-2 se mantiene un R^2 alto y estable entre 0,71 y 0,74, mientras en la combinación de las bandas 8a y 12 claramente hay un punto, que ocupa la posición 49, que al eliminarlo mejora sustancialmente la correlación, superando incluso

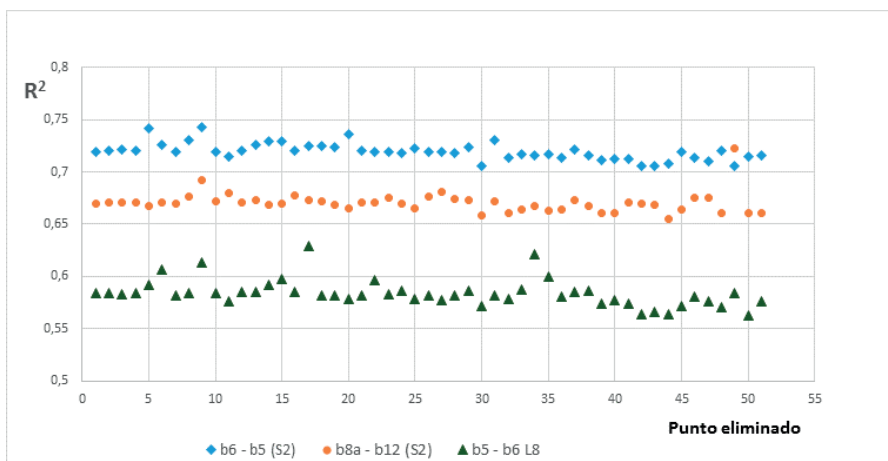


Figura 9. Coeficiente de determinación R² al eliminar un punto de los índices dNDSI con las bandas 6 y 5 de S2, 8a y 12 de S2 y 5 y 6 de L8.

muchas correlaciones de la combinación de las bandas 6 y 5. También para el caso de Landsat-8, se observa un aumento significativo en la correlación, en este caso eliminando el punto 17. Para mostrar resultados más robustos, hemos eliminado de cada una de las combinaciones de bandas el punto que, al eliminarlo, más aumenta la correlación, y hemos vuelto a ordenar los resultados según R². En la tabla 3 se muestran los nuevos resultados de las 10 mejores combinaciones de bandas en Sentinel-2 y la mejor combinación de Landsat-8 eliminando un punto en cada una de ellas. En esta tabla se observa que se mantiene la mejor combinación con las bandas 6 y 5 de S2, pero ahora en segunda posición se sitúa la combinación 8a y 12 del clásico NBR, mejorando también otras combinaciones parecidas

como la 7 y 12 y la 6 y 12, bandas que combinan el Red-Edge con el SWIR.

Además del menor número de bandas, otro factor que puede afectar fuertemente a la menor correlación obtenida con Landsat-8 frente a Sentinel-2 es su resolución espacial, (30 m frente a los 10 y 20 m de S2), pues es difícil encontrar en las campañas de campo zonas uniformes de 30 m de lado. Por ello los píxeles de L8 seguramente abarcan zonas de diferente nivel de intensidad. Para una mejor calibración con datos de campo de L8 se debería repetir esta metodología buscando zonas uniformes más extensas, que deberían ser muy superiores a 30 m para evitar también los efectos de borde.

Tabla 3. Coeficiente de determinación (R²), error de estimación y ecuación de las correlaciones entre nivel de severidad y los diferentes índices dNDSI (x) de S2 y L8 eliminando un punto del ajuste.

Sentinel-2				
Bandas	R ²	Error	Ecuación	Punto eliminado
6 – 5	0,742	0,76	NS=17,141 x + 0,721	9
8a – 12	0,723	0,77	NS=11,026 x – 2,109	49
8a – 5	0,722	0,79	NS=16,890 x + 0,135	14
7 – 5	0,716	0,79	NS=16,215 x + 0,510	5
6 – 2	0,710	0,81	NS=9,9001 x – 0,146	6
7 – 12	0,707	0,79	NS=10,783 x – 1,783	49
6 – 4	0,707	0,81	NS=9,5284 x + 0,764	31
6 – 12	0,702	0,80	NS=10,831 x – 1,520	49
8 – 4	0,701	0,82	NS=10,201 x + 0,307	31
6 – 3	0,696	0,82	NS=11,567 x + 0,329	31
Landsat-8				
5 – 6	0,629	0,92	NS=10,071 x – 1,9472	17

Con el objetivo de analizar e interpretar los resultados obtenidos, en la Figura 10 se han representado tres espectros de reflectividad antes y después del incendio, obtenidos de las imágenes Sentinel-2 y que corresponde a NS=1, 3 y 5 observado en campo. En la Figura 11 se ha representado la diferencia entre esos espectros. En estas figuras se observa que cuanto mayor es la severidad las diferencias en la banda 12 (SWIR, 2190 nm) son más negativas, ordenándose también por severidad en la otra banda del SWIR (la b11, 1610 nm). Las diferencias en el visible (bandas 2, 3 y 4) aparecen ordenadas por severidad, pero las diferencias aumentan en la pendiente del espectro en la región del *Red-Edge*, hecho que explicaría la mejora en la correlación obtenida con las bandas 6 y 5 y mostrada en las Tablas 2 y 3. La relación de las bandas del *Red-Edge* con el área quemada ha sido utilizada por otros autores, como Fernández-Manso *et al.* (2017) y Chuvieco *et al.* (2006) que llegan también a la conclusión de que los índices espectrales que usan bandas del *Red-Edge* son adecuados para distinguir diferentes niveles de severidad de los incendios.

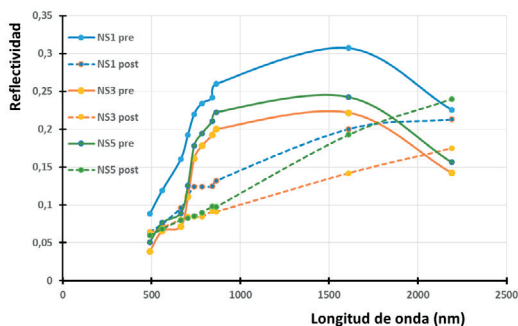


Figura 10. Espectros de reflectividad de Sentinel-2 antes (en continuo) y después del incendio (en líneas discontinuas) con tres niveles de severidad diferente NS=1, 3 y 5.

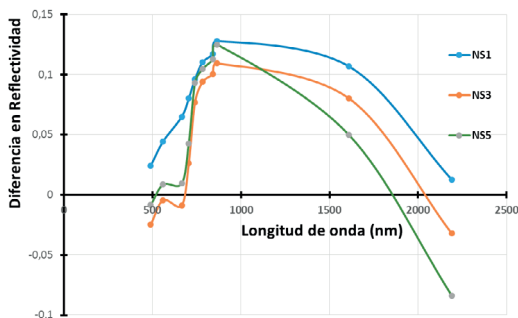


Figura 11. Diferencia entre los espectros de Sentinel-2 antes y después del incendio.

A partir de las ecuaciones mostradas en la Tabla 3, se puede calcular el grado de severidad con dos imágenes L8 y S2. A modo de ejemplo, en la Figura 12 se muestra el mapa de nivel de severidad obtenido para la zona en estudio a partir de las imágenes S2 y aplicando la ecuación:

$$NS = 17,141 \left(\left(\frac{R_{740} - R_{704}}{R_{740} + R_{704}} \right)_{pre} - \left(\frac{R_{740} - R_{704}}{R_{740} + R_{704}} \right)_{post} \right) + 0,721 \quad (3)$$

Donde R_i es la reflectividad en la banda centrada en la longitud de onda i (en nm).

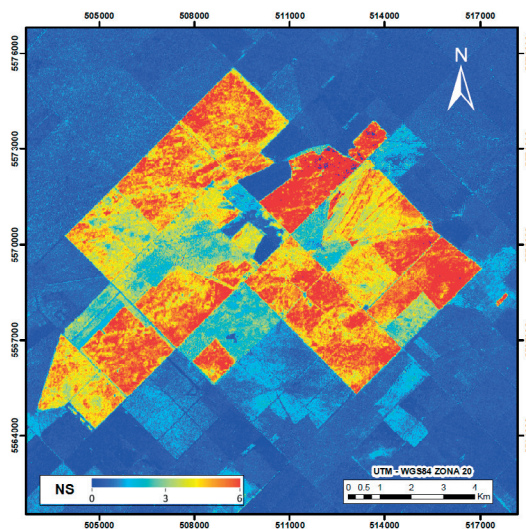


Figura 12. Mapa del nivel de severidad del incendio en la zona en estudio a partir de S2 (Delegido *et al.*, 2017).

Con el fin de mostrar la congruencia entre los valores de NS observados en campo y de NS obtenidos en la Figura 12 y los equivalentes del mapa realizado con Landsat-8, en la Figura 13 se muestran los valores del nivel de severidad estimados con S2 con la ecuación (3) y con L8 usando la ecuación de la Tabla 3 frente a los observados en campo. En las gráficas de la Figura 13 se muestra en rojo la línea 1:1 que indicaría la correspondencia perfecta entre ambos valores. Se observa la mejor correspondencia en el caso de S2, aunque en ambos casos se sobreestiman los valores bajos de NS y se subestiman los valores altos.

Para analizar la capacidad de recuperación de la vegetación después del incendio, se ha calculado el LAI con el método propuesto por Delegido *et al.* (2013) en una imagen Sentinel-2 de la zona obtenida cuatro meses después del incendio (el 17 de abril

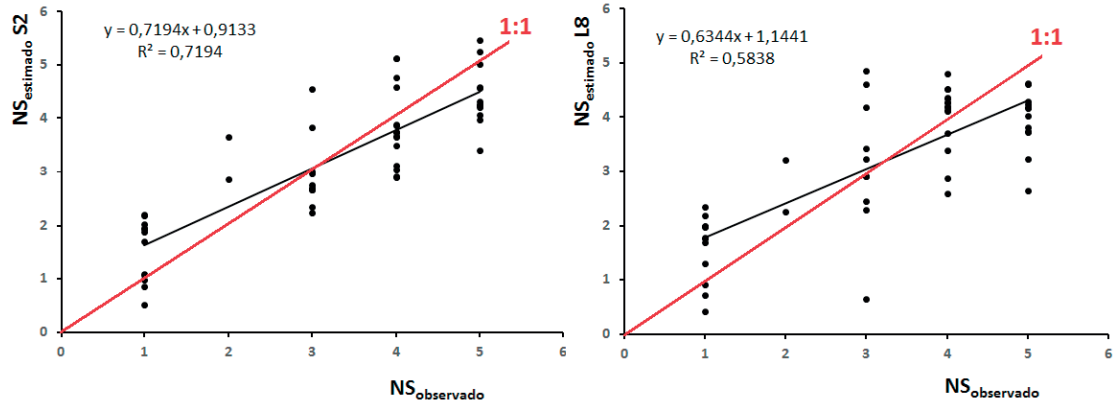


Figura 13. Valores del NS calculados con S2 (izquierda) y con L8 (derecha) frente a los valores de NS observados en la campaña de campo.

de 2017). En la Figura 14 se muestra el *Scatter Plot* de los valores de LAI de cuatro meses después del incendio frente a los de NS obtenido con las imágenes días antes y después del incendio, observando a grandes rasgos que, valores altos de severidad proporcionan menores valores de LAI y al revés. Esta correlación inversa es pequeña debido a la alta dispersión de los valores, lo cual es lógico pues la recuperación de la vegetación no solo depende de la severidad del incendio, sino que influyen gran cantidad de factores ambientales locales, como son la composición y estructura del suelo, pendiente, tipo de vegetación predominante, uso, si estuvo bajo pastoreo, incluso el hecho de que puedan haber sido afectadas por diferentes lluvias cuando la extensión espacial es grande. Para observar mejor esta correlación, se ha calculado el valor medio y la desviación estándar de LAI y de NS, aplicando máscaras a ambos mapas dividiendo los valores de NS en cinco intervalos elegidos de manera que el número de puntos en cada intervalo sea similar. En la Figura 15 se muestran los resultados, observando que salvo el punto con menor NS, en el resto se mantiene una clara tendencia inversa que indica mejor recuperación de la vegetación al disminuir el nivel de severidad del incendio. Para observar mejor esto, se muestra en la gráfica el ajuste lineal con todos los puntos (en azul) y eliminando el punto, observando que en ambos casos la pendiente es negativa pero aumentando sensiblemente la correlación al eliminar el primer punto. El hecho de que el punto de menor NS no siga tan claramente esta tendencia, puede ser debido a que es un intervalo mucho más amplio que el resto y que incluye una gran cantidad de píxeles que no han sido afectados

por el fuego, por lo que el valor del LAI solo depende de condiciones locales fundamentalmente relacionadas con el tipo de suelo, vegetación predominante y pastoreo. Sin embargo del resto de puntos se puede deducir que las zonas con un nivel de severidad más alto muestran mayores dificultades para la regeneración de la vegetación.

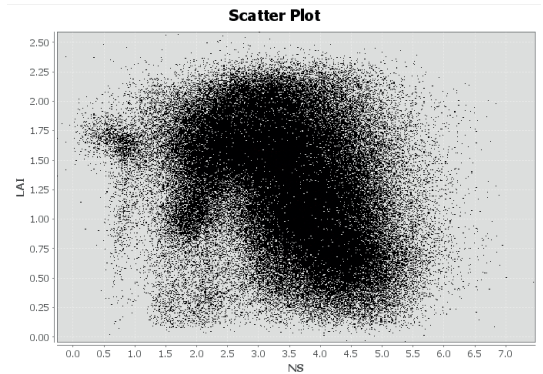


Figura 14. *Scatter Plot* del LAI de 17 de abril frente a NS.

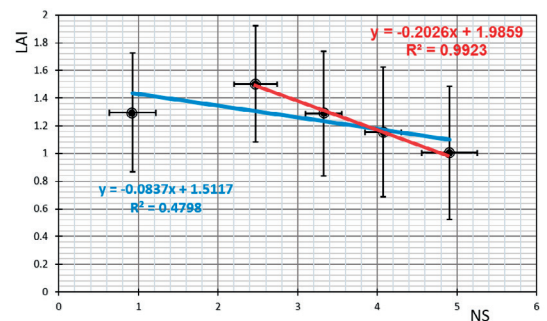


Figura 15. Promedios de LAI y NS por intervalos de NS con barras de error. En azul se muestra el ajuste de todos los puntos y en rojo eliminando el menor NS.

4. Conclusiones

A partir de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 antes y después del incendio ocurrido en diciembre de 2016 al sur de la Provincia de Buenos Aires y de la campaña de campo observando la severidad del incendio en cinco niveles, se ha comprobado que la mejor estimación del nivel de severidad se obtiene usando una diferencia entre índices de diferencia normalizada usando las bandas centradas en 740 nm y 704 nm de Sentinel-2 antes y después del incendio. Este resultado resalta la importancia de las bandas del *Red-Edge* para estudios de incendios por teledetección, coincidiendo con otros autores. Se ha observado también una alta correlación entre los valores de nivel de severidad observados en campo y el clásico índice dNBR obtenido con las bandas 8a y 12 de Sentinel-2 centradas en 865 y 2200 nm. Además se ha obtenido una correlación inversa entre la recuperación de la vegetación cuatro meses después del fuego y el nivel de severidad del incendio, mostrando valores más altos de LAI donde menos severo ha sido la intensidad del fuego.

A pesar de las diferencias en las correlaciones, también Landsat-8 puede ser usado para la estimación de la severidad de los incendios rurales usando el índice dNBR. Ambos satélites se pueden usar para el estudio de incendios en los ecosistemas del Espinal y del Monte y su análisis temporal, mejorando la estimación con las nuevas bandas en el *Red-Edge* de Sentinel-2. El tiempo de revisita de S2A y S2B de 5 días junto a la disponibilidad de L8, proporcionan grandes posibilidades de obtener imágenes libres de nubes de una zona para el estudio multitemporal de la recuperación vegetal tras los incendios.

Referencias

Botella-Martínez, M. A., Fernández-Manso, A. 2017. Study of post-fire severity in the Valencia region comparing the NBR, RdNBR and RBR indexes derived from Landsat 8 images. *Revista de Teledetección*, 49, 33-47. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7095>

Bran, D., Cecchi, G., Gaitan, J., Ayesa, J., Lopez, C. 2007. Efecto de la severidad de quemado sobre la regeneración de la vegetación en el Monte Austral. *Revista Ecología Austral*, 17(1), 123-132.

Cabrera, A. 1951. Territorios fitogeográficos de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. IV, N° 1 – 2.

Casas, R., Irurtia, C., Michelena, R. 1978. Desmonte y habilitación de tierras para la producción agropecuaria en La República Argentina. *Suelos*, 157. Buenos Aires, Argentina.

Cecchi, G. A., Krofpl, A.I., Kugler, N. et al., 2006. Principales gramíneas forrajeras perennes del monte. EEA Valle Inferior Convenio INTA – provincia de Río Negro.

Chuvieco, E. 2002. *Teledetección Ambiental*. Ed. Ariel Ciencia, Barcelona, España.

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>.

Cocke, A. E., Fulé, P. Z., Crouse, J. E. 2005. Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14(2), 189-198. <https://doi.org/10.1071/WF04010>

Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C. M., Rivera, J. P. Alonso, L., Moreno, J. 2013. A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over Agroecosystems. *European Journal Agronomy*, 46, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.12.001>

Delegido, J., Meza, C.M., Pasqualotto, N., Moreno, J. 2016. Influencia del ángulo de observación en la estimación del índice de área foliar (LAI) mediante imágenes PROBA/CHRIS. *Revista de Teledetección*, 46, 45-55. <https://doi.org/10.4995/raet.2016.4612>

Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E. P., Jiménez-Muñoz, J. C., Soria, G., Sobrino, J. A., Moreno, J. 2017. Potencialidad de índices de severidad de incendios utilizando Sentinel2 y su análisis comparativo con Landsat8 para la cartografía en los incendios rurales en el Sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina) 2016-2017. *XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Murcia, 3 al 7 octubre 2017.

De Santis, A., Chuvieco, E. 2007. Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. 2006. *Remote Sensing of Environment*, 108, 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.022>

Diaz-Delgado, R., Lloret, F., Folliott, P. F. 2003. Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1751-1763. <https://doi.org/10.1080/01431160210144732>

- ESA. 2017. ESA's Sentinel Satellites. Available online: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Facts_and_figures (acceso el 31 de marzo de 2017)
- Escuin, S., Navarro, R., Fernandez, P. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 1053-1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- 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>
- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., Quintano, C., Marcos, E., Calvo, L. 2017. Utilización de las imágenes Sentinel-2 para cartografía de área quemada. *Congreso AET*, Murcia 3-7 Octubre 2017.
- Ghermandi, L., Gonzalez, S., Lescano, M., Oddi, F. 2013. Effects of fire severity on early recovery of Patagonian steppes. *International Journal of Wildland Fire*, 22, 1155-1062. <https://doi.org/10.1071/WF12198>
- González, S. 2002. *El Banco de semillas como estrategia de regeneración postfuego en un pastizal del Noroeste de la Patagonia*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional del Comahue, S.C. de Bariloche, Argentina.
- González, S. 2011. *Estrategias de regeneración postfuego en pastizales del noroeste patagónico: un enfoque experimental*, PhD thesis, Centro Regional Universitario Bariloche, Argentina.
- González-Alonso, F., Merino-De-Miguel, S., Roldán-Zamarrón, A., García-Gigorro, S., Cuevas, J. M. 2007. MERIS Full Resolution data for mapping level-of-damage caused by forest fires: the Valencia de Alcántara event in August 2003. *International Journal of Remote Sensing*, 28:3-4, 797-809. <https://doi.org/10.1080/01431160600979115>
- 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. En *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.
- Kröpfl, A., Cecchi, G., Villasuso, N., Rossio, E., Pelotto, J. 2005. *Manual de especies silvestres del monte Rionegrino*. Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior – Centro Universitario Regional Zona Atlántica (UNC). Ediciones INTA, Argentina.
- Lamberto, S. 1987. Vegetación natural. En: *Evaluación expeditiva del recurso suelo y uso y cobertura de la tierra en el sur de la provincia de Buenos Aires. Informe técnico N° 28*. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi. Bahía Blanca, Argentina.
- López-García, M. J., Caselles, V. 1991. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 1, 31-37. <https://doi.org/10.1080/10106049109354290>
- Martínez, S., Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J. 2017. Burn severity and regeneration in large forest fires: an analysis from Landsat time series. *Revista de Teledetección*, 49, 17-32. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7182>
- Montorio, R., Pérez, F., García, A., Vlassova, L., de la Riva, J. R. 2014. La severidad del fuego: Revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. En: José Arnáez, Penélope González-Sampérez, Teodoro Lasanta y Blas L. Valero Garcés (eds.). *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz*. Logroño: Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC): Universidad de La Rioja, España.
- NASA, National Aeronautics and Space Administration. 2017. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/>
- Navarro, G., Caballero, I., Silva, G., Parra, P., Vázquez, A., Caldeira, R. 2017. Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.003>
- Nicora, M. G. 2014. *Actividad eléctrica atmosférica en Sudamérica*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas La Plata, Buenos Aires.
- Quintano, C., Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O. 2018. Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 221-225. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.014>

- Roldán-Zamarrón, A., Merino-de-Miguel, S., González-Alonso, F., García-Gigorro, S., Cuevas, J. M. 2006. Minas de Riotinto (south Spain) forest fire: Burned area assessment and fire severity mapping using Landsat 5-TM, Envisat-MERIS, and Terra-MODIS postfire images. *Journal Geophysical Research*, 111, G04S11. <https://doi.org/10.1029/2005JG000136>
- Van Der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Van Leeuwen, T. T., Chen, Y., Rogers, B. M., Mu, M., Van Marle, M.J.E., Morton, D.C., Collatz, G.J., Yokelson, R.J., Kasibhatla, P. S. 2017. Global fire emissions estimates during 1997-2016. *Earth System Science Data*, 9(2), 697-720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
- Vanzolini, J., Pezzola, A., Iurman, D., Vasicek J., Cantamutto, M. 2017. Reporte de la recorrida en las áreas afectadas por fuego en Villarino y Patagones. Informe técnico. Estación Experimental Agropecuaria INTA Hilario Ascasubi. Argentina.