Recibido: 11/01/2017
Aceptado: 14/08/2017

REVISTA DE TELEDETECCIÓN
Asociación Española de Teledetección
(2017) 49, Número especial, 33-47
ISSN 1133-0953
EISSN 1988-8740
https://doi.org/10.4995/raet.2017.7095

Estudio de la severidad post-incendio en la Comunidad Valenciana comparando los índices dNBR, RdNBR y RBR a partir de imágenes Landsat 8

Botella-Martínez, M. A.*[1], Fernández-Manso, A.[2]

[1] *Vaersa (Generalitat Valenciana), Avenida de las Cortes Valencianas n°20, (46015) Valencia, España.*

[2] *Ingeniería y Ciencias Agrarias, Escuela Superior y Técnica de Ingenierías Agrarias, Universidad de León. Campus de Vegazana S/N. (24071) León, España.*

Resumen: En territorios de ámbito mediterráneo, con su climatología característica que incluye largos periodos de sequía y lluvias que suelen concentrarse en episodios torrenciales, los gestores forestales, tras un incendio, se enfrentan a una serie de decisiones que pueden ser de carácter urgente, algunas de ellas muy correlacionadas con el grado de daño causado por el fuego. En este sentido, el objeto de este estudio ha sido proporcionar una herramienta rápida y fiable para la evaluación inicial de la severidad post-incendio en este tipo de territorios, a partir de técnicas de teledetección. Para nueve incendios ocurridos en la Comunidad Valenciana, zona típicamente mediterránea, y a partir de imágenes Landsat 8, se han calculado tres índices de severidad: dNBR, RdNBR y RBR. Se han obtenido, para cada índice, los umbrales operativos de clasificación de la severidad en cuatro categorías (no quemado, baja, moderada y alta), validados utilizando como referencia-terreno fotografías aéreas tomadas desde helicóptero. Posteriormente se evaluó el grado en que la severidad post-incendio está influenciada por factores asociados a la vegetación pre-incendio, utilizando para ello un análisis de varianza. Este análisis sirvió para comparar los tres índices en cuanto a su robustez frente a la influencia de estos factores. Con estos datos, y con el estudio de la precisión de clasificación a través del estadístico Kappa, se ha podido llegar a una proposición de índice más idóneo para el cálculo de la severidad post-incendio en el territorio estudiado, con sus umbrales operativos validados. Los resultados obtenidos permiten pensar que podrían ser extrapolables a otros territorios de características similares.

Palabras clave: severidad post-incendio, evaluación inicial, ámbito mediterráneo, Landsat 8, dNBR, RdNBR, RBR, umbrales de clasificación.

Study of post-fire severity in the Valencia region comparing the NBR, RdNBR and RBR indexes derived from Landsat 8 images

Abstract: In Mediterranean territories, with their characteristic climate that implies long periods of drought and rains often concentrated in torrential episodes, forest managers are faced with a series of decisions that can be urgent after a wildfire, some of them strongly correlated with the degree of damage caused by fire. In this sense, the object of this study was to provide a fast and reliable tool for the initial assessment of post-fire severity in these kinds of territories, by means of remote sensing techniques. Using Landsat 8 imagery, we have calculated three fire severity indices

To cite this article: 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

* *Corresponding author: botella2043@yahoo.es*

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

(dNBR, RdNBR, and RBR) for nine fires occurred in the Valencia region, a typical Mediterranean area. For each index, post-fire severity classification thresholds have been obtained taking into account the following categories: unburned, low, moderate, and high. These thresholds have been validated using, as ground-reference, aerial photographs taken from a helicopter. Afterwards, the degree to which post-fire severity was influenced by factors associated with pre-fire vegetation was evaluated, using a variance analysis. This analysis served to compare the three indices in terms of their robustness against the influence of these factors. With the obtained data, and with the study of classification accuracies employing the Kappa statistic, we were able to propose the most suitable index for calculating post-fire severity in the Valencia region, along with its operating thresholds. The findings suggest that the results could be extrapolated to other areas of similar characteristics.

Key words: post-fire severity, initial assessment, Mediterranean area, Landsat 8, dNBR, RdNBR, RBR, classification thresholds.

1. Introducción

Los incendios de alta intensidad pueden alterar dramáticamente los hábitats en los que se desarrollan. Este tipo de incendios, sobre todo si son de gran magnitud, pueden llegar a eliminar gran parte, o incluso totalmente, la cubierta protectora que las especies vegetales proporcionan al suelo. Además, este tipo de incendios también puede quemar la materia orgánica en su capa superior, con la consiguiente pérdida de los agregados del suelo, que puede aumentar en gran medida su erosionabilidad (Neary *et al.,* 2005). Los efectos de un incendio de alta severidad pueden producir una recuperación más lenta de la vegetación y del suelo, mayores acumulaciones de combustibles gruesos e incrementar la severidad de futuros incendios (Lentile *et al.,* 2006). Por otra parte, especies de insectos como los escolítidos *Tomicus* sp., *Orthotomicus* sp e *Ips* sp, entre otros, atacan a árboles vivos que se encuentran debilitados y cuyas defensas no pueden hacer frente a estos ataques. Después de un incendio, en las zonas donde la severidad haya sido baja e incluso moderada, quedarán árboles vivos, pero debilitados, que quedarán muy expuestos (Gibson and Negrón, 2009). Esto puede provocar una explosión en las poblaciones de los insectos perforadores y convertir estas zonas en un foco de plagas. La determinación de los distintos grados de severidad con el que un incendio forestal ha afectado a un determinado territorio supone, por tanto, una herramienta de gran relevancia para el gestor que se ha de encargar de la restauración post-incendio. La toma de decisiones en relación a las medidas encaminadas a frenar la erosión, la corta de la madera quemada, la restauración de la cubierta vegetal o la lucha contra las plagas forestales, por poner unos ejemplos, puede verse facilitada si se dispone de una cartografía de rangos de severidad fiable y ajustada a la realidad. Por otra parte, disponer de una cartografía histórica de perímetros de incendio y su severidad permite a la comunidad científica entender las tendencias a lo largo del tiempo en cuanto al grado de afección de los incendios en un determinado territorio (Eidenshink *et al.,* 2007). En este sentido, la teledetección, y más concretamente el uso de imágenes satélite, tiene cada vez más relevancia en la gestión integral de los incendios forestales. A lo largo del tiempo se han ido desarrollando una serie de índices para cartografiar y monitorizar los efectos de los incendios forestales a partir de datos procedentes de teledetección. El *Normalized Burn Ratio* (NBR) es un índice espectral que combina las bandas del infrarrojo cercano y el de onda corta para distinguir entre las zonas quemadas y las no quemadas, e incluso ofrecer información sobre la variación en la severidad del fuego dentro de la zona quemada (Key y Benson, 2006). Posteriormente se propuso la creación del RdNBR (dNBR relativo) para eliminar la influencia de la vegetación pre-fuego, lo que hipotéticamente permite crear clasificaciones categóricas utilizando los mismos umbrales para incendios que ocurran en tipos similares de vegetación, sin la necesidad de adquirir datos de calibración para cada incendio (Miller *et al.,* 2009). Más recientemente, se ha propuesto como alternativa al dNBR y al RdNBR un nuevo índice para calcular la severidad, llamado Relativized Burn Ratio (RBR) (Parks, Dillon y Miller, 2014). A partir de estos índices se pueden generar mapas en los que la severidad

se representa en forma de categorías temáticas discretas, distinguiendo, generalmente, entre "no quemado", "severidad baja", "severidad moderada" y "severidad alta". Dado que los índices proporcionan datos de naturaleza continua, para clasificar la severidad en categorías discretas es necesario establecer los umbrales de corte.

Por otra parte, desde el punto de vista ecológico, la clasificación de la severidad está muy ligada al tiempo transcurrido entre la ocurrencia del incendio y el momento en el que se realiza la medición. De tal manera que en la práctica se distinguen al menos dos intervalos de evaluación distintos, el *inicial* y el *extendido*, cada uno de los cuales posee un contenido de información y funciones distintas (Key, 2006). La *evaluación inicial* supone la primera oportunidad para obtener una evaluación ecológica del incendio esencialmente completa, ya que de forma ideal se realiza cuando el incendio ya ha terminado y se dispone, además, de datos de buena calidad. El tiempo transcurrido se considera que ha de estar entre la ocurrencia del incendio y 8 semanas después (Key, 2006). Es la modalidad utilizada cuando se han de tomar decisiones de gestión de carácter urgente, donde la priorización de las actuaciones es fundamental. En contraste, la *evaluación extendida* se plantea durante la primera estación de crecimiento después del incendio. Este tipo de evaluación permite valorar la supervivencia retardada (de vegetación que ha ardido, pero cuyas raíces o tallos permanecen viables y rebrotan), así como la mortalidad retardada, en la que las plantas parecen sanas exteriormente inmediatamente después del incendio, pero terminan muriendo por daños en las raíces o en el cambium. La elección del tipo de evaluación a realizar va a depender, por tanto, de los objetivos que se persigan. Los umbrales de clasificación que suelen encontrarse en la bibliografía especializada (Key y Benson, 2006; Miller y Thode, 2007; Cansler y McKenzie, 2012; Parks *et al.,* 2014) están referidos a la modalidad de *evaluación extendida* de la severidad. Sin embargo, los territorios con clima mediterráneo suelen contar con períodos prolongados de sequía, lluvias torrenciales y, en consecuencia, generalmente un elevado riesgo de erosión y avenidas. Teniendo en cuenta que las labores de estabilización de laderas, restauración hidrológica e incluso las decisiones de corta de madera para evitar proliferaciones de plagas no pueden esperar hasta el año siguiente al incendio, queda patente que resultaría de gran utilidad disponer de unos valores umbrales de clasificación de la severidad basados en el tipo de *evaluación inicial*. Dado que se trata de actividades costosas y de urgencia, disponer de esta cartografía de una forma lo más automatizada posible permitiría priorizar y optimizar los trabajos, sobre todo en incendios de grandes dimensiones.

2. Objetivos

Como objetivo general, se pretende desarrollar una metodología para generar cartografía temática de severidad post-incendio desde la perspectiva de una evaluación inicial, en cuatro categorías: no quemado, severidad baja, moderada y alta. A partir de este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Determinación y validación de umbrales de clasificación para los índices dNBR, RdNBR y RBR.
- El estudio de la influencia de factores asociados a la vegetación pre-incendio en la variabilidad de la severidad expresada por los índices dNBR, RdNBR y RBR.
- Comparación de los índices dNBR, RdNBR y RBR en cuanto a la precisión de clasificación de la severidad en relación a la referencia-terreno y en cuanto a su robustez frente a los factores de variabilidad estudiados. Determinación del índice más idóneo para el territorio estudiado, con sus umbrales operativos.

3. Material y métodos

3.1. Área de estudio y principales datos de los incendios incluidos

Los incendios incluidos en el presente estudio se enmarcan en el ámbito territorial de la Comunidad Valenciana. Zona representativa de áreas mediterráneas, cuenta con tres provincias, de norte a sur: Castellón, Valencia y Alicante, y se encuentra en el litoral levantino del Estado español. Su superficie es de 2.326.196 ha, de las que aproximadamente el 57% están consideradas como terreno forestal (Generalitat Valenciana, 2013). El clima de la Comunidad Valenciana es típicamente mediterráneo, y está caracterizado por las temperaturas

Tabla 1. Datos principales de los incendios incluidos en el estudio. Las coordenadas del punto de inicio están en UTM (WGS84).

Incendio	Provincia	Fecha incendio	Punto inicio (X / Y)	Superficie oficial (ha)	Altitudes (m)	Vegetación presente en la zona del incendio
Benaguasil	Valencia	7/19/2013	699229 / 4386618	77,91	114 - 251	*Pinus halepensis, Populus alba, Populus nigra, Arundo donax,* matorrales calcícolas mediterráneos
Ayora	Valencia	7/25/2013	664246 / 4316334	638,77	742 – 1.031	*Pinus halepensis, Quercus coccifera, Juniperus oxycedrus,* matorral calcícola de óptimo mesomediterráneo
Segorbe 1	Castellón	2/4/2014	717855 / 4407093	191,53	249 - 480	*Pinus halepensis, Juniperus oxycedrus,* garriga, matorral calcícola de óptimo mesomediterráneo
Godelleta	Valencia	4/22/2014	705269 / 4368076	340,8	133 - 328	*Pinus halepensis, Quercus coccifera,* herbazal y matorral bajo degradado mediterráneo
Calles	Valencia	5/14/2014	673166 / 4399876	96,09	348 - 497	*Pinus halepensis, Quercus ilex, Arundo donax,* formación arbustiva termófila mediterránea
La Vall d'Uxò	Castellón	7/20/2014	735081 / 4414348	183,3	214 - 648	*Pinus halepensis, Quercus ilex, Ceratonia siliqua,* matorrales y herbazales calcícolas mediterráneos
La Vall d'Ebo	Alicante	5/14/2015	745982 / 4299430	1.905,09	91 - 752	*Pinus halepensis, Ceratonia siliqua, Olea europaea,* garriga, lastonar de *Brachypodium retusum*
Segorbe 2	Castellón	5/16/2015	713148 / 4407478	39,81	541 - 808	*Pinus halepensis, Quercus coccifera, Cistus albidus,* matorrales calcícolas mediterraneos
Montán	Castellón	7/7/2015	708977 / 4432418	417,89	582 – 1.070	*Pinus halepensis, Quercus ilex, Juniperus oxycedrus,* aliagar mesomediterráneo de *Ulex parviflorus*

suaves y la sequía estival. La lluvia suele concentrarse en el otoño y la primavera, muchas veces con carácter torrencial, apareciendo largos periodos de precipitación escasa.

La superficie total afectada por los 9 incendios estudiados fue de aproximadamente 3891 ha. La selección de estos incendios se basó en sus fechas de ocurrencia (disponibilidad de imágenes del satélite Landsat 8), así como en criterios de distribución geográfica, tipologías de vegetación representadas y disponibilidad de información para la fase de muestreo. El periodo de ocurrencia de los incendios abarca un total de dos años, desde el mes de julio de 2013 (Benaguasil y Ayora), hasta el mes de julio de 2015 (Montán). La muestra puede considerarse muy representativa de los incendios típicos en zonas mediterráneas, con diferentes tipos de vegetación afectada (arbolado de coníferas y quercíneas, matorrales evolucionados, otros matorrales más degradados, vegetación de ribera, etc.), y abarca altitudes que van desde casi el nivel del mar hasta más de 1000 m.

Tanto la localización del área de estudio respecto al estado español, como la ubicación de los perímetros de los incendios pueden verse en la Figura 1.

3.2. Datos de teledetección. Imágenes Landsat 8 e índices de severidad calculados

Los principales datos de las imágenes de Landsat 8 utilizadas en el estudio se muestran en la Tabla 2.

Para cada imagen se realizó el siguiente pre-procesado: conversión de los niveles digitales (ND) de cada píxel a valores de reflectancia (TOA) en el techo de la atmósfera, tal como se describe en Ariza (2013). En el momento en que se realizó el estudio no tuvimos accesibilidad a los productos *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System* (LEDAPS), que corresponden a los productos de reflectividad de superficie corregidos atmosféricamente por la USGS – NASA (Masek *et al.,* 2013). Sin embargo, Miller y Thode

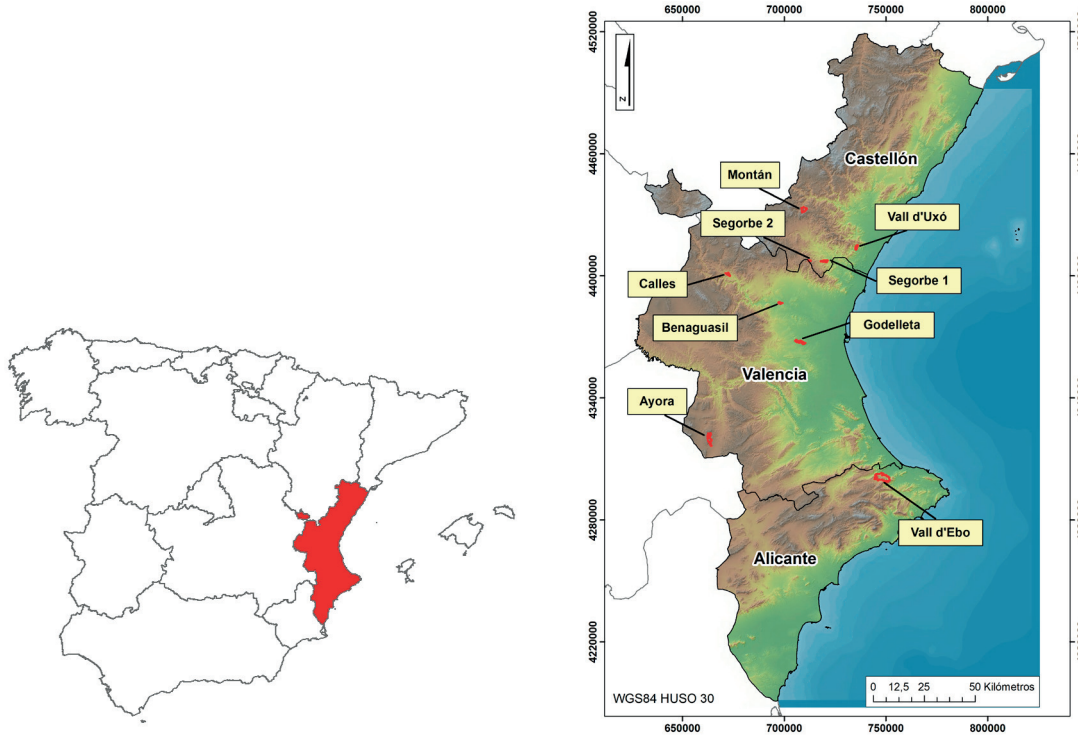


Figura 1. Mapa de localización de la Comunidad Valenciana dentro del Estado español y localización de los incendios incluidos en el estudio.

(2007) consideran que la dispersión atmosférica es despreciable en las bandas infrarrojas y, por tanto, en su estudio también eligieron no aplicar ningún tipo de corrección atmosférica. También se observó que desde el punto de vista orográfico la influencia de las sombras no era determinante, por lo que no fue necesaria una corrección topográfica.

Respecto a los índices, el NBR (*Normalized Burn Ratio*) maximiza los cambios de reflectancia en plantas y suelo debido a cambios drásticos como los incendios forestales. En este índice se combinan la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la del infrarrojo de onda corta (SWIR) (Key y Benson, 2006). En el caso de Landsat 8, las bandas a utilizar son la 5 y la 7, según la expresión: NBR=(B5–B7)/(B5+B7). Para aislar y separar mejor las zonas quemadas de las no quemadas y proporcionar una medida cuantitativa del cambio, se calcula el delta o *differenced NBR* (dNBR) (Key y Benson, 2006): dNBR=NBRpre–NBRpost×1000.

Dado que los índices de vegetación diferenciados absolutos están correlacionados con el contenido

Tabla 2. Datos principales de las imágenes Landsat 8 pre y post-incendio utilizadas.

Incendio	Fecha incendio	Fecha imagen pre-incendio	Fecha imagen post-incendio	WRS Path	WRS Row
Benaguasil	7/19/2013	7/19/2013	8/4/2013	199	32
Ayora	7/25/2013	7/19/2013	8/4/2013	199	33
Segorbe 1	2/4/2014	12/10/2013	2/12/2014	199	32
Godelleta	4/22/2014	3/16/2014	5/3/2014	199	33
Calles	5/14/2014	5/3/2014	6/4/2014	199	32
La Vall d'Uxò	7/20/2014	6/20/2014	7/22/2014	199	32
La Vall d'Ebo	5/14/2015	5/3/2014	6/7/2015	199	33
Segorbe 2	5/16/2015	5/6/2015	6/7/2015	199	32
Montán	7/7/2015	6/23/2015	8/10/2015	199	32

de clorofila pre-fuego de la vegetación dentro del perímetro del incendio, usar una medida absoluta del cambio podría llevar a caracterizar incorrectamente la severidad en píxeles que contuvieran de media menos clorofila anterior a la perturbación que los del terreno circundante (Miller y Thode, 2007). Para evitar estos problemas, Miller y Thode (2007) propusieron un índice, el RdNBR (*Relative Differenced Normalized Burn Ratio*), con la finalidad de generar datos de severidad que fueran independientes de la condición pre-incendio. Su expresión es la siguiente: $RdNBR=dNBR/(ABS(NBRpre))^{1/2}$.

En relación a este índice RdNBR, en Parks *et al.* (2014) los autores encontraron que desde el punto de vista matemático existían algunas dificultades con el denominador de la expresión. Su objetivo era, por tanto, proponer una métrica relativizada alternativa, que fuera sensible a los cambios donde la cobertura de la vegetación pre-fuego sea baja, pero que evitara las dificultades asociadas con la ecuación del RdNBR. A esta nueva métrica la llamaron *Relativized Burn Ratio* (RBR), cuya expresión es la siguiente: RBR=dNBR/(NBRpre + 1,001).

3.3. Material de campo para la validación de los cálculos y parcelas de muestreo

Como referencia de campo para ajuste y validación de los cálculos, se han usado fotografías aéreas tomadas desde helicóptero. La validez del uso de imágenes aéreas como método de calibración alternativa a otros procedimientos, como por ejemplo el CBI (Key y Benson, 2006), está ampliamente documentada (Stehman y Czaplewski, 1998; Cansler y McKenzie, 2012; Quintano *et al.,* 2013). Las fotografías utilizadas provienen de la Agencia de Seguridad y Respuesta a las Emergencias de la Generalitat Valenciana. Se trata de fotografías que se toman en algunos incendios durante su fase de evolución y en la fase post-incendio, principalmente para localización de frentes activos y labores de perimetración. Estas fotografías se tomaron con una cámara réflex digital Canon EOS-1000D, con un sensor de 10,1 megapíxeles, provista de una óptica zoom Canon 18-55 mm (equivalente a un 28-80 mm en paso universal), que permite adaptar el campo de visión a las necesidades requeridas, independientemente de la altura de vuelo del helicóptero, que suele estar en un rango de 500-1500 ft.

Sobre las fotografías aéreas se establecieron parcelas de muestreo de aproximadamente 30×30 m (mismo tamaño de píxel que las imágenes Landsat), en las que se definió el nivel de severidad observado (referencia-terreno) dentro de las siguientes clases: no quemado, severidad baja, moderada y alta. Se tomaron también datos de validación de zonas fuera del perímetro del incendio (clase "no quemado"). La determinación visual de la severidad se hizo en función del daño observado (adaptado de Parsons *et al.,* 2010):

- *Severidad baja*: en el caso del arbolado, las copas han quedado inalteradas en su mayor parte y, por tanto, permanecen verdes casi en su totalidad. El dosel arbustivo presenta signos de chamuscado, pero las manchas de quemado no son predominantes.
- *Severidad moderada*: en el arbolado, más de la mitad del área cubierta por las copas está chamuscada, pero se conservan las hojas o acículas, por lo que predomina el color marrón. El matorral aparece calcinado en su mayor parte, pero la ceniza que se observa es predominantemente de color negro.
- *Severidad alta*: en el arbolado, las copas están completamente consumidas en más del 50% del área cubierta, sin que queden hojas o acículas ni elementos finos, por lo que predomina el color negro. El matorral se observa completamente carbonizado, quedando solamente los elementos más gruesos. La ceniza presenta tonos grises o blanquecinos de forma predominante.

Dada la alta resolución (10,1 megapíxeles) de las fotografías digitales empleadas para la determinación visual del grado de severidad, las alturas de vuelo y las longitudes focales disponibles en el zoom óptico, estas fotografías se pueden ampliar en grado suficiente como para distinguir de forma adecuada las condiciones definidas en cada clase.

Los puntos centrales de cada parcela de muestreo se georreferenciaron sobre ortofotografías del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) en ArcGis versión 10.2, generándose un archivo *shape* (.shp) de puntos para cada incendio, que se utilizó posteriormente para la extracción de los valores de los índices calculados. Para facilitar

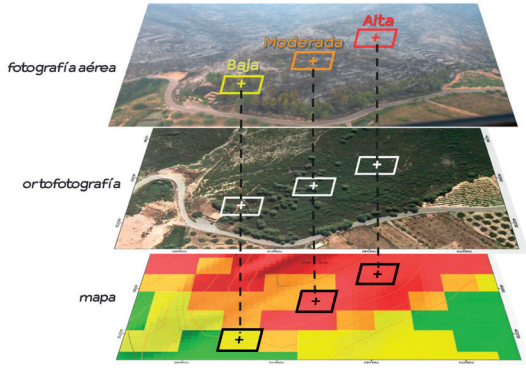


Figura 2. Ejemplo de fotografía aérea empleada en el proceso de validación, con parcelas de muestreo con distintos niveles de severidad, y georreferenciación en GIS.

la correcta georreferenciación de las parcelas de muestreo se hizo uso también de un modelo de relieve en 3D, que permite asimilar la perspectiva del terreno a la mostrada por la fotografía. De cada parcela de muestreo se tomó el valor del píxel al que correspondía geográficamente, para los tres índices de severidad. Esta operación se realizó en ArcGis 10.2 mediante interpolación bilineal para homogeneizar los posibles errores de georreferenciación, tal como recomiendan Cansler y McKenzie (2012). Este tipo de interpolación calcula el valor del punto mediante la identificación del centro de los cuatro píxeles más próximos, ponderando cada uno en función de su distancia al punto de destino y asignando un valor basado en el promedio ponderado de los cuatro valores de píxel. En la Figura 2 se muestra como ejemplo una de las fotografías usadas en el proceso de validación, en la que se han localizado los diferentes niveles visuales de severidad, así como un esquema del proceso de georreferenciación.

Respecto a la técnica de muestreo, se ha asimilado en la medida de lo posible a la recomendación general que dan Key y Benson (2006) para el caso del CBI. Los autores indican que, para aplicaciones de teledetección, prefieren un diseño de muestreo estratificado en cuanto a las distintas categorías de severidad consideradas, que represente el rango completo de severidad con un nivel de esfuerzo similar, siempre que sea posible. Según los autores, no existe necesidad de que las parcelas de muestreo estimen la composición espacial del incendio en sí mismo, ya que el producto derivado de la teledetección proporcionará, finalmente, el cómputo completo de la "población" de píxeles quemados. Por consiguiente, los autores consideran que las parcelas de muestreo solamente deben calibrar y/o validar los datos de teledetección, sin la necesidad de una estricta aleatoriedad espacial. En nuestro caso, siguiendo estas indicaciones, se ha maximizado tanto la capacidad de georreferenciar correctamente cada una de las parcelas de muestreo establecidas (suficientes puntos de referencia), como la de identificar visualmente con precisión la categoría de severidad que representaba lo observado en ellas.

En total se establecieron 714 parcelas de muestreo, cuya distribución por incendio y por categoría de severidad observada puede comprobarse en la Tabla 3. Se realizó el test de Levene para comprobar la homogeneidad de las varianzas en cuanto a las distintas categorías de severidad, que dio como resultado un P-Valor de 0,094, por lo que no hay razones para rechazar la hipótesis de homocedasticidad de las varianzas poblacionales. El porcentaje de píxeles muestreados representa un 1,2% del total de píxeles de las zonas quemadas.

Tabla 3. Número de parcelas de muestreo por categoría de severidad observada, y por incendio.

Incendio	Nº parcelas muestreo por categoría de severidad observada				
	No quemado	Baja	Moderada	Alta	TOTAL
Benaguasil	14	7	9	6	36
Ayora	26	20	18	36	100
Segorbe 1	24	10	22	26	82
Godelleta	30	3	22	45	100
Calles	24	7	24	5	60
La Vall d'Uxò	16	3	26	23	68
La Vall d'Ebo	25	5	36	49	115
Segorbe 2	17	0	5	34	56
Montán	27	2	25	43	97
TOTAL	203	57	187	267	714

3.4. Cálculo de los umbrales de clasificación

El cálculo de los umbrales de clasificación se realizó a partir de los datos de la fase de calibración. Cada parcela de muestreo tiene asignada una clase de severidad observada y el valor que le corresponde de cada índice. Utilizando los datos de las 714 parcelas se calculó el valor promedio de cada índice para cada categoría de severidad observada. A partir de estos promedios se calcularon los valores intermedios entre las distintas categorías de severidad consecutivas. Estos valores intermedios se emplearon como punto de partida para encontrar cada umbral de corte definitivo. Para ello, los valores de partida se introdujeron en un ciclo de ajuste iterativo, hasta encontrar los valores que clasificaban correctamente el mayor número de parcelas de muestreo con respecto a la severidad observada.

3.5. Estudio de factores influyentes en la variabilidad de la severidad. Análisis de varianza

Se tomaron los siguientes datos a nivel de parcela de muestreo en relación a la vegetación pre-incendio presente en las zonas quemadas:

Tipología de vegetación: se utilizaron ortofotografías del PNOA y las fotografías aéreas utilizadas en la fase de validación para clasificar visualmente cada parcela en las siguientes clases de vegetación:

- *Pastizal-matorral*: zonas de matorral degradado, con vegetación rala, donde existe una cobertura incompleta sobre el terreno.
- *Matorral*: zonas de matorral consolidado, con una cobertura del suelo total o casi total.
- *Arbolado*: zonas arboladas con una cobertura del suelo total o casi total sumando las copas del arbolado y el sotobosque existente.

Carga de combustible: dado que no se disponía de una cartografía fiable de la que pudieran extraerse valores cuantitativos de la carga de combustible, ésta se estimó de forma cualitativa para cada parcela de validación a partir de las ortofotografías del PNOA y las fotografías aéreas. Se distinguieron tres clases cualitativas distintas:

- *Carga de combustible baja* (clase 1).
- *Carga de combustible media* (clase 2).
- *Carga de combustible alta* (clase 3).

Con estos parámetros se realizaron análisis de varianza ANOVA y de componentes de la varianza. A partir de estos análisis se puede estudiar la sensibilidad de los índices de severidad frente a la influencia de cada factor y, por tanto, comparar su robustez.

3.6. Cálculo de la precisión de clasificación de la severidad

Los umbrales de clasificación para los tres índices compararon a nivel estadístico con la finalidad de calcular la precisión de clasificación de cada uno de ellos. La herramienta estadística en la que se fundamentó esta comparación es el índice Kappa (Congalton y Green, 2009). Los cálculos se realizaron para los tres índices a nivel del conjunto de todas las parcelas de muestreo, y también a nivel de incendio individual, para comprobar cómo se comportan los umbrales de clasificación en cada uno de los incendios.

4. Resultados

4.1. Umbrales de clasificación de la severidad post-incendio

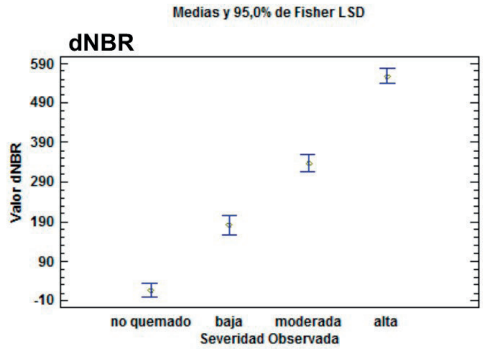
Después de los cálculos realizados, los umbrales obtenidos para la clasificación de la severidad post-incendio en modalidad de evaluación inicial, se pueden ver en la Tabla 4 para los tres índices.

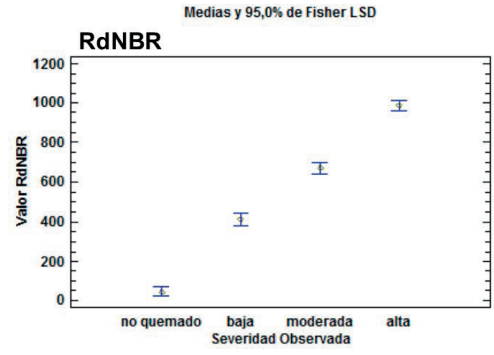
Tabla 4. Umbrales generales de clasificación de la severidad de incendio.

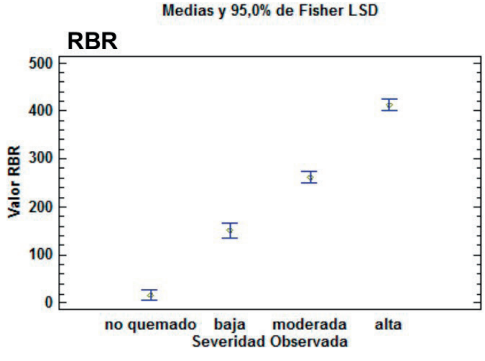
	Umbrales generales de categorías de severidad		
Índices	no quemado-baja	baja-moderada	moderada-alta
dNBR	160	260	481
RdNBR	230	475	835
RBR	105	200	355

4.2. Resultados del análisis de varianza

Las pruebas de rangos múltiples sobre el total de las 714 muestras (LSD de Fisher al 95% de nivel de confianza) mostraron, en primer lugar, que existen diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes categorías de severidad observada, con independencia del índice. Los resultados se muestran en la Figura 3.







dNBR

Severidad Observada	*Casos*	*Media LS*	*Sigma LS*	*Grupos Homogéneos*
no quemado	203	16,7935	13,8391	X
baja	57	181,531	19,0384	X
moderada	187	336,866	15,6092	X
alta	267	558,129	14,6551	X

RdNBR

Severidad Observada	*Casos*	*Media LS*	*Sigma LS*	*Grupos Homogéneos*
no quemado	203	47,3181	17,4376	X
baja	57	410,487	23,989	X
moderada	187	671,275	19,6681	X
alta	267	986,161	18,4658	X

RBR

Severidad Observada	*Casos*	*Media LS*	*Sigma LS*	*Grupos Homogéneos*
no quemado	203	16,6762	7,74593	X
baja	57	151,204	10,6561	X
moderada	187	262,484	8,73673	X
alta	267	412,736	8,20269	X

Figura 3. Pruebas de Rangos Múltiples (LSD Fisher al 95,0% de nivel de confianza) para los valores de los índices dNBR, RdNBR y RBR, en relación a las categorías de severidad observada.

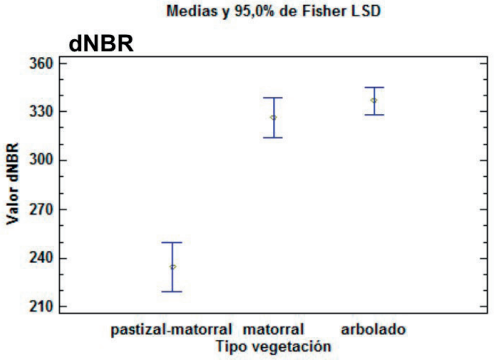
Las mismas pruebas de rangos múltiples para la severidad post-incendio reclasificada a partir de los umbrales obtenidos, confirmaron que también para los tres índices existen diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes categorías de severidad calculada.

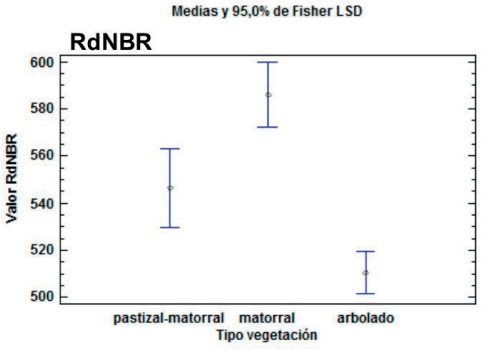
La Tabla 5 muestra los resultados de los distintos análisis de varianza (ANOVA y Componentes) para los factores de influencia estudiados.

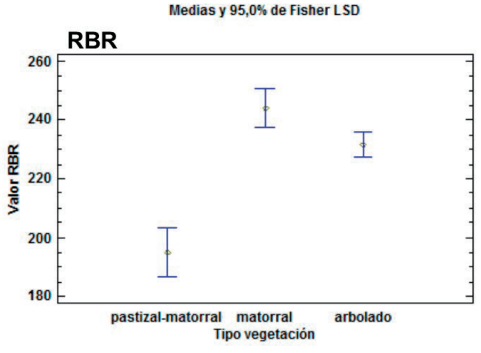
El análisis de componentes (Tabla 5) deja patente que el factor que más contribuye a la varianza es la propia severidad, siendo el porcentaje más alto en el índice RdNBR. Por otra parte, tanto el tipo de vegetación como la carga de combustible son capaces de explicar un porcentaje de variabilidad mucho mayor en el índice absoluto dNBR (Tabla 5), que en el caso de los índices relativos (RdNBR y RBR).

Tabla 5. Resultados del análisis ANOVA y de Componentes para los índices dNBR, RdNBR y RBR. P-Valores y porcentaje de variabilidad aportada por cada factor.

Conjuntos	P-Valores			Porcentaje de variabilidad		
	dNBR	RdNBR	RBR	dNBR	RdNBR	RBR
A: Severidad Observada	0,000	0,000	0,000	83,03	92,24	90,33
B: Tipo vegetación	0,000	0,000	0,000	4,34	1,20	1,80
Error				12,63	6,56	7,88
A: Severidad Observada	0,000	0,000	0,000	81,96	92,54	90,10
B: Carga de combustible	0,000	0,551	0,000	8,10	0,70	2,81
Error				9,94	6,77	7,10







dNBR

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
pastizal-matorral - matorral	*	-92,0446	26,6121
pastizal-matorral - arbolado	*	-102,322	24,7219
matorral - arbolado		-10,2774	20,0126

RdNBR

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
pastizal-matorral - matorral	*	-39,7811	28,888
pastizal-matorral - arbolado	*	36,0125	26,8361
matorral - arbolado	*	75,7936	21,7241

RBR

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
pastizal-matorral - matorral	*	-49,0771	14,2438
pastizal-matorral - arbolado	*	-36,5015	13,2321
matorral - arbolado	*	12,5756	10,7115

Figura 4. Pruebas de Rangos Múltiples (LSD Fisher al 95,0% de nivel de confianza) para los valores de los índices dNBR, RdNBR y RBR, en relación al factor "Tipo de vegetación".

La Figura 4 muestra el gráfico de medias y las pruebas de múltiples rangos del factor "tipo de vegetación", para el índice dNBR. Como se observa, se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre la categoría de vegetación pastizal-matorral y las otras dos (matorral y arbolado), mientras que no existen diferencias significativas entre estas dos últimas. Las mismas pruebas para los índices RdNBR y RBR pueden verse también en la Figura 4. En este caso, se encontraron diferencias significativas entre las tres categorías de vegetación, aunque con una influencia mucho menor en la variabilidad (Tabla 5).

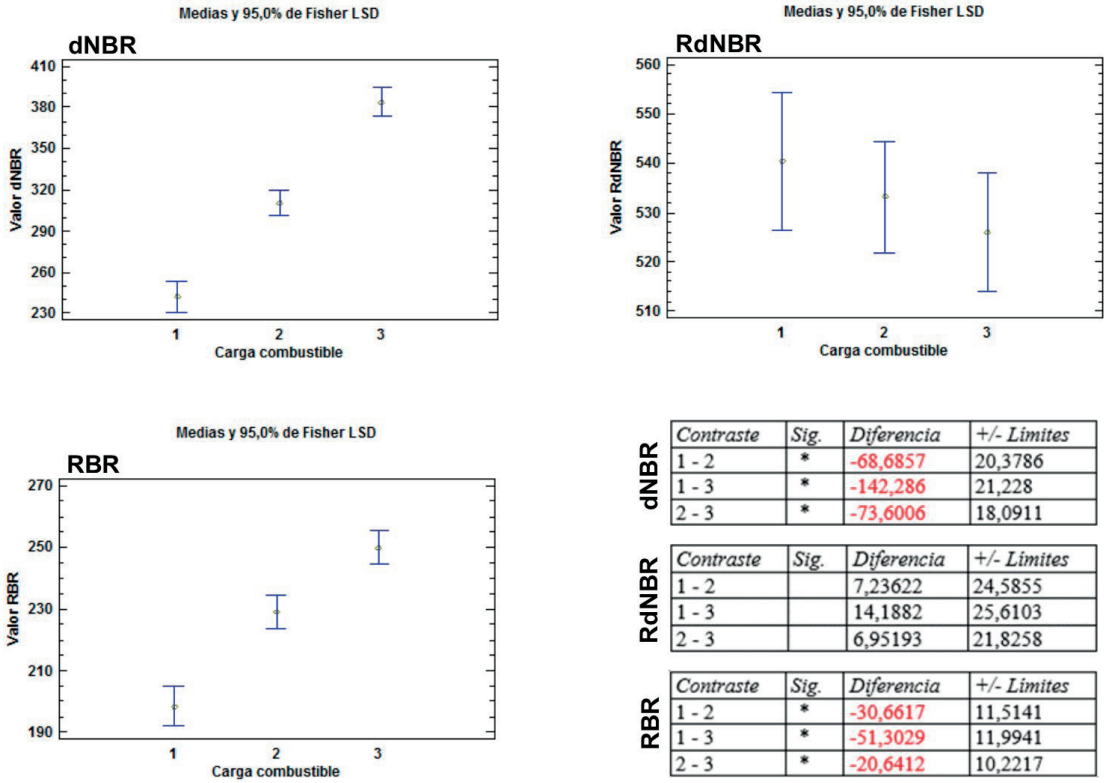
Los resultados del factor "Carga de combustible" han quedado reflejados en la Figura 5. Los datos muestran que se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre las tres categorías de carga de combustible en los índices dNBR y RBR, mientras que para el caso del RdNBR no hay diferencias significativas entre ninguna de estas categorías.

4.3. Resultados del cálculo de la precisión de clasificación a partir de los umbrales obtenidos

Se realizaron análisis del estadístico Kappa para los índices dNBR, RdNBR y RBR. En todos los casos se calculó la precisión de clasificación global (utilizando el conjunto de las 714 muestras) y también la precisión por incendio individual.

En el caso del dNBR (Tabla 6), la fiabilidad global para el conjunto de las 714 muestras fue del 83,1%. Individualmente por incendio, la fiabilidad global osciló entre el 72,1% del incendio de Vall d'Uxó y el 94,8% de Vall d'Ebo. Para el total de las muestras el valor del índice Kappa fue de 0,76.

Los resultados para los índices relativos RdNBR y RBR (Tabla 6) fueron muy similares entre ellos y mejoraron los obtenidos por el dNBR. La fiabilidad global del conjunto de las parcelas fue del 88,9% para el RdNBR y del 88,5% para el RBR y ambos índices obtuvieron el mismo valor del índice Kappa conjunto (0,84).



dNBR

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Limites
1 - 2	*	-68,6857	20,3786
1 - 3	*	-142,286	21,228
2 - 3	*	-73,6006	18,0911

RdNBR

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Limites
1 - 2		7,23622	24,5855
1 - 3		14,1882	25,6103
2 - 3		6,95193	21,8258

RBR

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Limites
1 - 2	*	-30,6617	11,5141
1 - 3	*	-51,3029	11,9941
2 - 3	*	-20,6412	10,2217

Figura 5. Pruebas de Rangos Múltiples (LSD Fisher al 95,0% de nivel de confianza) para los valores de los índices dNBR, RdNBR y RBR, en relación al factor "Carga de combustible".

5. Discusión

La Tabla 7 muestra los valores de los umbrales de clasificación de la severidad obtenidos en este estudio para los índices dNBR, RdNBR y RBR, en comparación con los valores hallados por otros autores. Todos los valores encontrados en nuestro estudio están por encima de sus equivalentes en los demás estudios, con excepción del umbral de las categorías de baja/moderada para el índice dNBR en Key y Benson (2006) y en este caso la diferencia es escasa. La explicación a este hecho posiblemente se encuentra en que nosotros hemos realizado una evaluación inicial de la severidad, mientras que todos los demás estudios emplearon la modalidad de evaluación extendida y, por tanto, utilizaron imágenes post-incendio de un año

Tabla 6. Valores del estadístico Kappa para los índices dNBR, RdNBR y RBR.

	dNBR		RdNBR		RBR	
Incendios	Fiabilidad Global (%)	Índice Kappa	Fiabilidad Global (%)	Índice Kappa	Fiabilidad Global (%)	Índice Kappa
Benaguasil	75,0	0,65	86,1	0,81	77,8	0,69
Ayora	73,0	0,65	94,0	0,92	85,0	0,80
Segorbe 1	90,2	0,86	85,4	0,80	92,7	0,90
Godelleta	80,0	0,70	90,0	0,85	81,0	0,72
Calles	81,7	0,73	75,0	0,65	93,3	0,90
VallUxo	72,1	0,61	79,4	0,69	77,9	0,67
VallEbo	94,8	0,92	95,7	0,93	95,7	0,93
Segorbe 2	85,7	0,76	94,6	0,90	96,4	0,93
Montán	86,6	0,79	90,7	0,86	91,8	0,88
Conjunto	83,1	0,76	88,9	0,84	88,5	0,84

Tabla 7. Umbrales de clasificación de la severidad de los índices dNBR, RdNBR y RBR hallados en este estudio, en comparación con los obtenidos en otros estudios.

Estudios	Índice	Umbrales de clasificación a partir de teledetección		
		No quemado-Baja	Baja-Moderada	Moderada-Alta
(Key and Benson, 2006)	dNBR	100	270	440
(Miller and Thode, 2007)	dNBR	41	177	367
(Cansler and McKenzie, 2012)	dNBR	106	218	456
(Parks *et al.*, 2014)	dNBR	42	180	422
Este estudio	dNBR	160	260	481
(Miller and Thode, 2007)	RdNBR	69	316	641
(Cansler and McKenzie, 2012)	RdNBR	189	372	703
(Parks *et al.*, 2014)	RdNBR	99	319	704
Este estudio	RdNBR	230	475	835
(Parks *et al.*, 2014)	RBR	35	130	298
Este estudio	RBR	105	200	355

después de su ocurrencia. Según Key y Benson (2006), una evaluación inicial puede indicar una severidad considerablemente mayor (que requiera de umbrales más elevados), cuando ha transcurrido poco tiempo entre el incendio y la imagen post utilizada para los cálculos, en oposición a la que mostraría una escena del siguiente año de crecimiento.

Además, los resultados han dejado patente que para la muestra estudiada existe una separación estadísticamente significativa entre las cuatro diferentes categorías de severidad planteadas (no quemado, baja, moderada y alta) para los tres índices estudiados (Figura 3). Por otra parte, tanto el tipo de vegetación como la carga de combustible son capaces de explicar un porcentaje de variabilidad

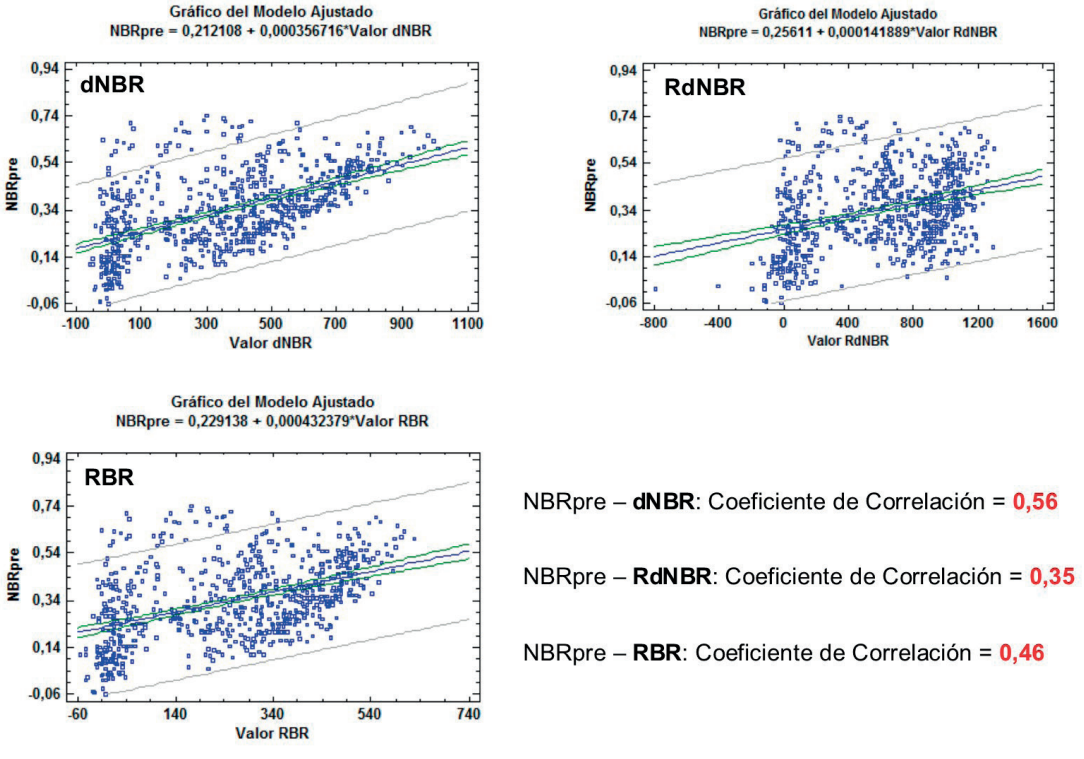


Figura 6. Pruebas de correlación entre el NBR pre-incendio y los índices de severidad, para el total de las 714 parcelas de muestreo.

mucho mayor en el índice absoluto dNBR, en comparación con los índices relativos RdNBR y RBR (Tabla 5). Este dato está en consonancia con el hecho de que los dos índices relativos tienen en cuenta de alguna manera las características de la vegetación anterior al incendio, al incorporar en su cálculo el término NBR pre-fuego y, por tanto, teóricamente deben ser menos sensibles a las variaciones espaciales tanto del tipo de vegetación como del grado de cobertura (Miller y Thode, 2007; Parks *et al.,* 2014). En el caso del dNBR, el gráfico de medias y las pruebas de múltiples rangos para el tipo de vegetación (Figura 4) muestran una diferencia significativa entre las zonas en las que la cobertura de combustible es más escasa (pastizal-matorral) y las zonas de mayor cobertura (matorral y arbolado), con valores del índice mucho menores en el primer caso. No obstante, entre las categorías de matorral y arbolado no existen diferencias significativas. Esto concuerda con Parks *et al.* (2014) y con Miller y Thode (2007), para los cuales las zonas en las que la cobertura de vegetación pre-fuego sea baja (valor NBR pre-fuego bajo) generalmente tendrán valores dNBR bajos, independientemente del grado de afección de la vegetación por el fuego y, por tanto, como medida absoluta del cambio, el dNBR simplemente no permite la cuantificación de alta severidad en esos casos, incluso si se consume toda la vegetación pre-fuego. Sin embargo, este no es el caso para los dos índices relativos (RdNBR y RBR), que en este estudio muestran una separación significativa entre las tres categorías de vegetación, pero no distinguen un patrón asociado al grado de cobertura del suelo (Figura 4), además de explicar un porcentaje variabilidad mucho menor que en el caso del dNBR (Tabla 5).

Con respecto a la carga de combustible, la Figura 5 muestra cómo, para el dNBR y el RBR, a mayor carga, mayores son las medias de los valores (aunque con menor dispersión en el caso del RBR). Sin embargo, el índice RdNBR es capaz de compensar su influencia (el P-Valor es mayor a 0,05 y no existen diferencias significativas entre las categorías). Estos datos parecen indicar que, de los dos índices relativos, el RdNBR es el que se muestra más robusto en cuanto a la influencia general de la vegetación pre-fuego. Ante estos resultados se consideró que tenía interés realizar pruebas de correlación entre los valores del NBR pre-fuego y los valores de los tres índices, para el total de las 714 parcelas de muestreo. En este caso, cuanto mayor fuera el coeficiente de correlación, mayor sería la influencia de la vegetación pre-fuego en el valor del índice estudiado. Los resultados de estas pruebas se muestran en la Figura 6. Los datos confirman que el RdNBR es el índice con menor correlación (r=0,35), seguido del RBR (r=0,46), siendo el dNBR el que muestra una correlación más fuerte con el NBR pre-fuego (r=0,56). Estos resultados coinciden con los hallados por Parks *et al.* (2014), que en su caso encontraron que la correlación con el NBR pre-fuego era siempre mayor para el dNBR (r=0,44), intermedia para el RBR (r=0,30) y más baja para el RdNBR (r=0,09).

En relación a la precisión de clasificación (Tabla 6), los resultados muestran que los índices relativos (RdNBR y RBR) mejoran la precisión con respecto al índice absoluto dNBR. Estos resultados eran previsibles ya que, como se ha visto, los índices relativos se han mostrado, en general, menos sensibles a la influencia de los factores estudiados. Los altos valores de correlación entre la severidad observada y la calculada por los tres índices, especialmente los relativos, indican que son una métrica útil y precisa dentro del rango geográfico representado por este estudio.

Finalmente, uno de los objetivos principales del estudio era comparar los índices en función de su mayor idoneidad para generar cartografía de severidad post-incendio de una forma lo más rápida y automatizada posible. Los resultados de la precisión de clasificación muestran que los dos índices relativos (RdNBR y RBR) se ajustan mejor a la referencia-terreno que el absoluto dNBR, mientras que entre el RdNBR y el RBR se han encontrado escasas diferencias en este sentido, comportándose de manera muy similar. Sin embargo, el análisis de varianza ha evidenciado que, en general, el RdNBR es el que se ha mostrado como el menos sensible de los tres índices a los factores de variabilidad estudiados. Este hecho puede resultar una ventaja importante de cara al estudio de la severidad de futuros incendios, ya que todos los indicios apuntan a que el RdNBR se comportaría de forma más robusta y, por tanto, más consistente. Por todo ello, se propone como índice más idóneo para la evaluación inicial de la severidad post-incendio en el territorio estudiado al RdNBR, con sus umbrales de clasificación validados, ya reflejados en la Tabla 4.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado la severidad post-incendio, en la modalidad de evaluación inicial, a través de técnicas de teledetección sobre un total de nueve incendios, que pueden considerarse una muestra muy representativa del territorio estudiado. A partir de los resultados hemos podido extraer las siguientes conclusiones:

- Existe una diferenciación estadísticamente significativa entre las categorías de severidad establecidas (no quemado, baja, moderada y alta), con independencia del índice empleado para su cálculo. Por tanto, una cartografía de severidad post-incendio basada en estas categorías temáticas representará niveles de daño suficientemente diferenciados.
- En relación a la precisión de clasificación, los tres índices estudiados se han mostrado como válidos para calcular la severidad post-incendio en el ámbito territorial del estudio, especialmente los índices relativos RdNBR y RBR, entre los que no se han encontrado apenas diferencias.
- En general, los índices relativos se han mostrado también menos sensibles que el índice absoluto a los factores de influencia estudiados. Concretamente, el índice que se ha mostrado más robusto ha sido el RdNBR, que además ha resultado ser el menos correlacionado con el NBR pre-incendio.
- Consideramos, por tanto, que el índice más idóneo para calcular la severidad post-incendio en el territorio estudiado es el RdNBR.
- Teniendo en cuenta que los incendios incluidos en el estudio son una muestra muy representativa dentro de este ámbito territorial, los resultados obtenidos en cuanto a robustez y precisión de clasificación (tanto global como a nivel de incendio individual), nos permiten pensar que a partir del índice RdNBR, con sus umbrales operativos validados, se podrá generar de forma consistente una cartografía de evaluación inicial de severidad post-incendio en la Comunidad Valenciana. Además, por la bondad de los resultados, creemos que estos umbrales pueden ser también válidos para otras zonas de clima mediterráneo cuya vegetación se asemeje a la de los incendios estudiados. No obstante, recomendamos realizar un seguimiento de esta metodología y comprobar sus resultados en posteriores trabajos.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la colaboración de la Agencia de Seguridad y Respuesta a las Emergencias de la Generalitat Valenciana, con mención especial a D. Jorge Suárez Torres, Subdirector General de la misma.

Referencias

Ariza, A. 2013. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica del IGAC -CIAF*, 46.

Cansler, C. A., McKenzie, D. 2012. How Robust Are Burn Severity Indices When Applied in a New Region? Evaluation of Alternate Field-Based and Remote-Sensing Methods. *Remote Sensing*, 4(12), 456–483. https://doi.org/10.3390/rs4020456

Congalton, R. G., Green, K. 2009. *Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and practices.* 2nd ed. Boca Ratón: CRC Press. Taylor & Francis. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Eidenshink, J., Schwind, B., Brewer, K., Zhu, Z., Quayle, B., Howard, S. 2007. A project for monitoring trends in burn severity. *Fire Ecology*, 3(1), 3–21. https://doi.org/10.4996/fireecology.0301003

Generalitat Valenciana. 2013. Plan de Accion Territorial Forestal de la Comunitat Valenciana (PATFOR). Web consultada el 21 de septiembre de 2015, http://www.habitatge.gva.es/web/medio-natural/patfor

Gibson, K., Negrón, J. F. 2009. Fire and bark beetle interactions. *The Western Bark Beetle Research Group: A Unique Collaboration With Forest Health Protection: Proceedings of a Symposium at the 2007 Society of American Foresters Conference*, 51–70.

Key, C. H. 2006. Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity. *Fire Ecology*, 2(2), 34–59. https://doi.org/10.4996/fireecology.0202034

Key, C. H., Benson, N. C. 2006. Landscape assessment (LA): Sampling and analysis methods. *USDA Forest Service General Technical Report RMS-GTR-164-CD*, 1–55.

Lentile, L. B., Smith, F. W., Shepperd, W. D. 2006. Influence of topography and forest structure on patterns of mixed severity fire in ponderosa pine forests of the South Dakota Black Hills, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 15 (October 2015), 557–566. https://doi.org/10.1071/WF05096

Masek, J. G., Vermote, E. F., Saleous, N., Wolfe, R., Hall, F. G., Huemmrich, F., Gao, F., Kutler, J., Lim, T. K. 2013. *LEDAPS Calibration, Reflectance, Atmospheric Correction Preprocessing Code*, Version 2. Oak Ridge, Tennessee, USA: ORNL DAAC.

Miller, J. D., Knapp, E. E., Key, C. H., Skinner, C. N., Isbell, C. J., Creasy, R. M., Sherlock, J. W. 2009. Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. *Remote Sensing of Environment,* 113(3), 645–656. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.009.

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 Sensing of Environment*, 109(1), 66–80. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006

Neary, D. G., Ryan, K. C., DeBano, L. F. 2005. Wildland Fire in Ecosystems. *Rocky Mountain Research Station General Technical Report*, 4 (RMRS-GTR-42).

Parks, S., Dillon, G., Miller, C. 2014. A New Metric for Quantifying Burn Severity: The Relativized Burn Ratio. *Remote Sensing*, 6(3), 1827–1844. https://doi.org/10.3390/rs6031827

Parsons, A., Robichaud, P. R., Lewis, S. A, Napper, C., Clark, J., Jain, T. B. 2010. Field guide for mapping post-fire soil burn severity. *Water*, (October), 49. https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-243

Quintano, C., Fernández-Manso, A., Roberts, D. A. 2013. Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) to map burn severity levels from Landsat images in Mediterranean countries. *Remote Sensing of Environment*, 136, 76–88. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.017

Stehman, S. V, Czaplewski, R. L. 1998. Design and Analysis for Thematic Map Accuracy Assessment - an application of satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 64(January), 331–344. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00010-8