

Estudio crítico de los índices de severidad y la superficie afectada por el incendio de Sierra de Luna (Zaragoza)

Guillem-Cogollos, R.*^{1,2}, Vinué-Visús, D.², Caselles-Miralles, V.¹, Espinós-Morató, H.³

¹ Grupo de Teledetección Térmica, Universitat de València, Burjassot, España.

² Geopixel S.L.

³ Institute of New Imaging Technologies - INIT, Universitat Jaume I, Castellón de la Plana, España.

Resumen: Para la determinación del área quemada y la severidad asociada del incendio de Sierra de Luna (Zaragoza), ocurrido el 4 de julio de 2015, se han calculado tres índices espectrales derivados de Landsat-8: NDVI, NBR y BAI. Comparando los resultados obtenidos por cada uno de ellos, en un incendio con extensas zonas de cultivo entre zonas arboladas, se ha determinado que la combinación de Δ NBR y BAI mejora sustancialmente la determinación del área realmente quemada, tanto en su perímetro exterior como en las zonas aisladas no quemadas de su interior. Para el cálculo de la severidad, se propone una metodología basada en el análisis de las diferencias de NBR, antes y después del incendio, y su combinación con el BAI, en función del valor previo al incendio de los índices NBR y de NDVI.

Palabras clave: severidad, Landsat, NDVI, NBR, BAI.

Critical analysis of severity indices and affected surface by the wildland fire on Sierra de Luna (Zaragoza)

Abstract: To determine the area burned by fire and its associated severity related to this forest fire taken place in Sierra de Luna (Zaragoza), on July 4th, 2015, three spectral indices derived from Landsat-8 imagery have been calculated: NDVI, NBR and BAI. Comparing the results obtained from each of them, in a wildland fire with extensive crop areas surrounded by forested areas, it has been demonstrated that combination of Δ NBR and BAI substantially improves the calculation of the burned area, concerning both in its external perimeter and in the unburned zones inside of the perimeter. For severity calculation is proposed a new methodology based on before and after NBR differences and its BAI combination, as a function pre-fire values of NBR and NDVI indices.

Key words: severity, Landsat, NDVI, NBR, BAI.

To cite this article: Guillem-Cogollos, R., Vinué-Visús, D., Caselles-Miralles, V., Espinós-Morató, H. 2017. Critical analysis of severity indices and affected surface by the wildland fire on Sierra de Luna (Zaragoza). *Revista de Teledetección*, 49, 63-77. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7117>

* Corresponding author: ruguico@alumni.uv.es

1. Introducción

El estudio del comportamiento de los incendios ha sido siempre de interés para la comunidad científica, siendo la previsión del movimiento del fuego en tiempo real un hito a conseguir (Balbi *et al.*, 2009). El comportamiento de un incendio forestal, en intensidad, espacio y tiempo, condiciona la superficie afectada y la capacidad de recuperación del ecosistema.

La intensidad del fuego representa la magnitud de producir calor cuando el combustible arde. Usualmente esto puede tratarse como energía emitida por unidad de longitud del frente de llama y por unidad de tiempo. Esta magnitud puede ser medida experimentalmente mediante termopares en series temporales, o mediante medidas de campo, de forma proporcional a la longitud de la llama y al ratio de propagación.

Sin embargo, si se enfoca el estudio en los efectos ecológicos que el fuego tiene sobre el ecosistema, se puede definir la severidad del incendio como el grado de cambios que el fuego induce en el medio, o cuánto el fuego afecta al ecosistema (Montorio *et al.*, 2015). Desde este punto de vista se puede deducir que severidad e intensidad de un incendio van a estar relacionadas, pero esta relación no es necesariamente trivial, ya que los diferentes sistemas ecológicos muestran varios grados de sensibilidad al fuego. Considerando todos los incendios posibles, existe una gran heterogeneidad entre una baja y una alta severidad (Smith y Mc Demird, 2014).

Tras un incendio se producen cambios directos en el ecosistema. Éstos incluyen la pérdida de la materia orgánica y los cambios químicos y físicos en la materia inorgánica, así como en el potencial de supervivencia de la vegetación a corto y medio plazo. La severidad también incluye la respuesta de la vegetación a largo plazo, a su vez influenciada por distintos factores biofísicos relacionados con los bancos de semillas que sobrevivan al incendio, la localización, la topografía, la climatología o los efectos secundarios como la erosión. También la presencia de cenizas tiene un impacto temporal en la respuesta ambiental del área quemada (Montorio *et al.*, 2015).

Dado que la severidad se basa en el impacto sobre plantas y el suelo una vez se extingue el incendio y

está relacionada con la fase post-incendio (Santis y Chuvieco, 2009) y con las condiciones del suelo y vegetación anteriores al incendio. Se han propuesto gran cantidad de métodos de campo para su estimación (Martínez *et al.*, 2013), incluyendo un amplio rango de variables. Debido a la dificultad en incendios de gran magnitud para abarcar amplias superficies afectadas a partir de observaciones de campo, se considera el uso de imágenes de satélite para su estudio. Estos métodos son ampliamente utilizados con este fin desde sus primeras aplicaciones (Navarro, 1991; Viedma y Chuvieco, 1994) y la evaluación de superficies quemadas mediante imágenes *Landsat* ofrece buenos resultados como se ha podido contrastar en numerosos trabajos, como Pérez y de la Riva, 1998 y Mattar *et al.*, 2012.

Desde el punto de vista de la gestión del territorio el entendimiento de un incendio por medio del estudio de su extensión y su severidad es fundamental con el objetivo de extrapolar a otras zonas las actuaciones selvícolas preventivas y de determinar las mejores intervenciones de extinción llegado el caso.

Como primer paso para ese fin, el propósito de este estudio fue delimitar con gran precisión el área afectada tras un incendio y su severidad asociada, para lo cual se evaluaron los índices espectrales *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Bisquert, 2011), *Normalized Burn Ratio* (NBR) (Laclaustra *et al.*, 2003) y *Burn Area Index* (BAI) (Bisquert, 2011) a partir de imágenes *Landsat-8* (L8), tanto previas como posteriores al incendio (Chuvieco y Martín, 2001; Escuín *et al.*, 2008).

2. Materiales

2.1. Zona de estudio

Se eligió como zona de estudio el área afectada por el incendio ocurrido en Sierra de Luna en julio de 2015, que según la prensa (Periódico Aragón), quemó un total de 14.000 ha de vegetación, de las cuales 8.000 ha eran de cultivo de cereal. El incendio de Sierra de Luna empezó el 5 de julio de 2015 a las 16:30 (Diario ABC), y se extendió rápidamente sobre cultivos de cereal y pinos carrascos (*Pinus halepensis* Mill.), principalmente.

2.2. Condiciones ambientales en la zona y fecha de estudio

Dada la naturaleza del trabajo, para la interpretación tanto de las zonas afectadas como de las no afectadas se debe tener en cuenta aquellos factores que pudieran influir en la dinámica de los incendios. Como parámetros a estudiar se seleccionaron la temperatura ambiental, la precipitación en fechas previas al incendio, la humedad relativa ambiental, la dirección y la velocidad del viento, los usos de suelo de la zona y la topografía del terreno.

Los valores de temperatura y precipitación se obtuvieron del servicio meteorológico español (AEMET) mediante su base de datos de estaciones y de aquellas de predicción meteorológica que guardan estos datos (AccuWeather y el Instituto Aragonés de Estadística).

En términos promedio, las temperaturas durante el verano de 2015 fueron especialmente altas (máximas de 38 ± 1 y $40\pm 1^\circ\text{C}$ los días 4 y 5 de julio), siendo la media mensual de mínimas y máximas de $28,2$ y $35,8^\circ\text{C}$, y quedando registrada la temperatura más alta en el histórico de datos del AEMET para la provincia de Zaragoza, $44,5^\circ\text{C}$, medida por la estación meteorológica del aeropuerto de Zaragoza el 7 de julio.

Las precipitaciones durante el mes de junio y julio fueron prácticamente nulas, habiendo una precipitación acumulada previa a los días del incendio de 80 mm. En cuanto a la humedad relativa (AEMET), los valores de principios de julio fueron los más bajos del mes, con un valor de un $35\pm 1\%$. En conjunto, la sequedad del ambiente y las altas temperaturas fueron de especial importancia en el inicio y la propagación del incendio.

La información del viento, se obtuvo de la estación meteorológica de Ejea de los Caballeros (DatosClima), situada a unos 20 km en la visual del lugar del incendio. La velocidad del viento no fue especialmente elevada los días en que se produjo el incendio. Sin embargo, la predominancia de las direcciones este y sureste influyeron en la propagación y en la baja humedad relativa.

2.3. Cartografía

La biomasa existente y el terreno se analizaron a partir de los modelos de combustible ofrecidos por el Inventario Forestal Nacional y el Mapa Forestal Español (MFE) para la provincia de Zaragoza (IFN, 2006), que son mapas digitales que se proporcionan de forma libre. Aunque por su cadencia de actualización no eran contemporáneos a la fecha del incendio, se consideraron válidos para el análisis posterior.

2.4. Imágenes del satélite Landsat 8

Debido a la resolución espacial (30×30 m por píxel en las bandas utilizadas) que ofrece Landsat-8, se utilizaron sus imágenes para el estudio del área afectada por el incendio y el análisis del comportamiento del fuego, estudiando con detalle las zonas que quedaron sin quemar.

Para ello se realizó un estudio multitemporal basado en las imágenes obtenidas por Landsat-8 de los días julianos 181 (30 de junio) y 190 (9 de julio) de 2015, correspondientes a la relación *Path 200, Row 31 y Path 199, Row 31*, respectivamente.

Las imágenes Landsat-8 (L8) se obtuvieron de la web *Earth Explorer* del USGS (EarthExplorer). Estas imágenes incluyen cuentas digitales que guardan relación directa con la radiancia y las reflectividad de las bandas (Chuvieco, 2009; Pettinari y Chuvieco 2015).

Se obtiene de forma muy sencilla la reflectividad en el techo de la atmósfera (TOA) usando imágenes L8 (Ariza, 2013) gracias a la calibración proporcionada por los metadatos adjuntos. Se aplica la ecuación 1

$$\rho_{\lambda}' = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho} \quad (1)$$

con la siguiente corrección (ecuación 2)

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\sin(\theta_e)} \quad (2)$$

donde ρ_{λ}' es el valor de la reflectancia planetaria sin corrección por el ángulo de incidencia solar, M_{ρ} es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido a partir de los metadatos. A_{ρ} es el factor aditivo de escalado también proporcionado por los metadatos. Q_{cal} es el valor numérico de píxel y θ_e es el ángulo de elevación solar (Ariza, 2013).

Haciendo uso de la ecuación 1 y los valores de ajustes proporcionados por los metadatos se obtuvo un valor para la reflectividad, realizando sobre ella la corrección debida al ángulo de incidencia solar, ecuación 2, que, para esos días son 63,85° y 64,70° respectivamente. Sobre estos valores de la reflectancia se aplica el método *Dark Object Substraction* (DOS) (Hantson et al., 2011) a fin de aplicar la corrección atmosférica a las reflectividades.

3. Metodología

3.1. Índices

Tras un incendio existen dos tipos muy diferentes de señal, la que corresponde a superficies recientemente quemadas, donde la señal procede de las cenizas y el carbón de la superficie como consecuencia de la combustión de la vegetación y otra, más duradera, que se produce como consecuencia del deterioro o pérdida de la masa forestal afectada por el fuego (Robinson y Bodmer, 1999). La segunda señal es más estable, si bien su persistencia es muy variable, ya que depende de la vegetación y la climatología del área afectada, y esta variación puede ser debida a otras razones distintas al efecto del fuego; por ello se precisan imágenes inmediatamente posteriores al incendio.

A pesar de este problema, existe un acuerdo bastante razonable en cuanto a la caracterización espectral de las zonas afectadas por incendios forestales. Hay numerosos estudios, como el de Gómez y Martín, 2006, basados tanto en medidas radiométricas de campo como en resultados obtenidos a partir de imágenes de satélite, que ofrecen una buena caracterización de estas zonas.

Las áreas quemadas tenderán a presentar muy bajas reflectividades en las bandas visible, infrarrojo próximo y medio, similares a las que nos ofrecen las zonas de agua o sombra que, en ocasiones, pueden inducir a error. Además, según las zonas y su capacidad productiva, y en periodos relativamente cortos tras el incendio, la señal de la zona afectada podrá equipararse con la de la zona no afectada por el fuego.

Según estas premisas, se justifica el uso de diversos índices espectrales en la caracterización de las áreas afectadas por incendios, entre los que se han seleccionado NDVI, NBR y BAI.

3.1.1. NDVI

El índice de vegetación normalizada o NDVI permite conocer la cantidad y calidad de la vegetación a partir de la medida de la respuesta espectral de dos bandas del espectro electromagnético. Para ello se estudia la reflectancia en la banda del rojo y del infrarrojo cercano (Bisquert, 2011). Este comportamiento en las plantas se debe a que reflejan en mayor parte, de forma natural, la radiación solar del infrarrojo cercano para evitar un sobrecalentamiento. El NDVI viene dado por la ecuación 3

$$NDVI = \frac{\rho_{R^-} - \rho_{IRC}}{\rho_{R^+} + \rho_{IRC}} \tag{3}$$

donde ρ_{R^-} y ρ_{IRC} son las reflectividades a nivel de superficie en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano.

3.1.2. NBR

El índice NBR es un índice similar al NDVI, pero que ofrece una mejor respuesta para el caso específico del estudio de los incendios forestales, ya que utiliza las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo cercano de onda corta (Karl, 2001). Fue diseñado originalmente para el estudio de grandes áreas quemadas mediante imágenes de teledetección obtenidas a partir de satélites como Landsat. Su expresión viene dada por la ecuación 4

$$NBR = \frac{\rho_{IR^-} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IR^+} + \rho_{SWIR}} \tag{4}$$

donde ρ_{IRC} y ρ_{SWIR} son las reflectancias a nivel de superficie en las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta, respectivamente.

El índice NBR toma valores entre 0 y 1, y guarda una relación con el NDVI, ya que ambos miden cuánta energía es reflejada por la vegetación respecto a la energía solar incidente.

Tabla 1. Relación entre el índice ΔNBR y la severidad (Key y Benson, 1999 ; Karl, 2001).

NBR	Severidad Incendio
< -0,25	Alto repoblamiento
-0,25 a -0,1	Bajo repoblamiento
-0,1 a 0,1	Sin quemar
0,1 a 0,27	Baja severidad
0,27 a 0,44	Moderada severidad
0,44 a 0,66	Moderada-Alta severidad
> 0,66	Alta severidad

Para trabajar con estos dos índices, se necesitan dos imágenes, una previa al incendio y otra posterior. La diferencia de valor del índice NBR entre estas imágenes proporciona variaciones importantes. El valor de ΔNBR está directamente relacionado con la severidad del incendio (Karl, 2001). En una primera aproximación, se utilizan los valores ofrecidos por el *software USGSFireMom*, que pueden verse en la Tabla 1. Aunque son valores obtenidos bajo condiciones específicas en los Estados Unidos, y no tienen porque ser válidos al extrapolar a otra zona de estudio, son utilizados como una primera aproximación al cálculo de la extensión del incendio, puesto que estos valores se han estudiado ya en diversas ocasiones en la península Ibérica (Escuín *et al.*, 2008), dando buenos resultados en la interpretación de la severidad post-incendio.

Se han diseñado otros índices para evaluar las zonas dañadas por el fuego basados en el NBR. Éstos son el *Relative Delta Normalized Burn Ratio* ($R\Delta NBR$) (ecuación 5) y el *Relativized Burn Ratio* (RBR) (ecuación 6), ambas modificaciones sobre el NBR para mejorar los resultados dependiendo de la caracterización ecológica de la zona (Miller y Thode, 2007; Miller *et al.*, 2009; Parks *et al.*, 2014).

$$R\Delta NBR = \frac{NBR_{pre} - NBR_{post}}{\sqrt{|(NBR/1000)|}} \quad (5)$$

$$RBR = \frac{\Delta NBR}{NBR_{pre} + 1001} \quad (6)$$

3.1.3. BAI

Por último, el índice de área quemada o *Burn Area Index* (BAI) se basa en la distancia espectral entre los valores de la imagen en el rojo e infrarrojo cercano y el punto de convergencia que se define como la respuesta espectral típica de las áreas recientemente quemadas, para esas bandas (Martín y Chuvieco, 2001). Viene dado por la ecuación 7

$$BAI = \frac{1}{(\rho_{c_r} - \rho_R)^2 + (\rho_{c_{IRC}} - \rho_{IRC})^2} \quad (7)$$

donde ρ_R y ρ_{IRC} son las reflectividades a nivel del suelo en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano, respectivamente. ρ_{c_r} y $\rho_{c_{IRC}}$ son unas constantes de valor 0,1 y 0,06, respectivamente, que fueron obtenidas a partir de un exhaustivo análisis del

comportamiento espectral de áreas recientemente quemadas, realizado sobre una serie temporal de imágenes tomadas por el sensor *NOAA-AVHRR*, adquiridas sobre la península Ibérica en los años 1991, 1994 y 1995 (Martín y Chuvieco, 2001).

3.2. Cálculo de índices

Haciendo uso de una combinación de bandas en el visible e infrarrojo cercano se identificó el área quemada, sobre la que se realizó un recorte de la imagen.

Aplicando en esta zona las ecuaciones 3 y 4 a los valores de reflectividad en las imágenes anterior y posterior al incendio se obtuvieron los índices NDVI y NBR. Las bandas de Landsat-8 utilizadas para el cálculo de NDVI fueron la 4 y 5, y la 4 y 7 para el cálculo de NBR (Ariza, 2013). Para la obtención del valor final se restaron los resultados de las imágenes anterior y posterior según las ecuaciones 8 y 9.

$$\Delta NDVI = NDVI_{pre} - NDVI_{post} \quad (8)$$

$$\Delta NBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad (9)$$

En el caso del BAI se aplica la ecuación 7 sobre la imagen posterior al incendio.

3.3. Evaluación del área quemada

Se calculó el total del área quemada. Para el caso del NDVI se ha aplicado el criterio de múltiples desviaciones estándar (Escuín *et al.*, 2008).

$$X_{limite} = M_i \pm aDesvEst_i \quad (10)$$

donde X_{limite} es el valor límite del índice que define el área quemada, N_i es el valor medio del índice i , a es una constante que puede tomar valores entre 0,1 y 2 (Chuvieco, 1996), y $DesvEst_i$ es la desviación estándar del valor de índice de la muestra de píxeles considerados.

El valor de la constante a se obtiene de forma iterativa en función de los resultados. En este caso se tiene en cuenta que el área quemada concuerda con las observaciones que podemos realizar en el visible. En el caso del ΔNBR , se siguió el mismo

procedimiento, considerando como área quemada los valores comprendidos entre 0,15 y 1.

Para el cálculo del BAI se aplicó un valor límite, ya que algunas zonas de cultivo o de agua pueden presentar reflexiones espectrales similares a la zona afectada por el incendio. De igual forma que para el caso del NDVI, se consideraron diversos criterios o valores de BAI, con valores mínimos y máximos distintos, para encontrar el valor óptimo. La modificación de estos valores tiene un efecto inmediato sobre el valor del área total afectada estimada por el BAI.

3.4. Validación de resultados

Ante la necesidad de una validación de los resultados obtenidos y la imposibilidad de la realización de medidas de campo, se consideró la opción de correlacionar los datos obtenidos con los valores de NDVI previos ($NDVI_{pre}$), incluyendo información sobre la topografía del terreno. Con objeto de realizar dicha validación se calculó la correlación entre ΔNBR y $NDVI_{pre}$ (Cocke et al., 2005).

Complementariamente se comprobó la coincidencia en las zonas de mayor valor de $NDVI_{pre}$ dentro del área quemada con las zonas de mayor valor de severidad que fueron obtenidas a partir de ΔNBR .

Se realizó paralelamente la misma comprobación sobre las áreas no quemadas obtenidas a partir de la combinación de ΔNBR y BAI.

Por último se realizó la validación sobre los límites aplicados para la obtención de la severidad a partir de la comparación de ΔNBR frente a NBR_{pre} , NBR_{post} frente a NBR_{pre} , $\Delta NDVI$ frente a $NDVI_{pre}$, $NDVI_{post}$ frente a $NDVI_{pre}$, NBA frente a NBR_{pre} y $NDVI_{pre}$.

4. Resultados y discusión

La sección de resultados y discusión se ha dividido en tres partes. En la primera parte se estimó el área quemada mediante la utilización de los índices espectrales y la combinación de éstos. En la segunda se estudió la severidad y en la tercera se realizó análisis de las zonas interiores no quemadas.

4.1. Evaluación del área quemada

Como se ha comentado anteriormente, el valor de la constante a , incluida en la ecuación 10, se obtuvo de forma iterativa. En el caso del índice NDVI, el valor de la desviación estándar obtenido fue muy elevado, como se observa en la Tabla 2, por lo cual la confianza que se otorgó al $\Delta NDVI$ para este cálculo concreto fue pequeña, motivo por el que se hizo uso del ΔNBR y BAI.

Se observó que el ΔNBR permite obtener un valor del área afectada mucho más preciso. Por el contrario no permite distinguir entre las posibles islas o zonas no quemadas en el interior del incendio.

En el caso del BAI, se compararon los resultados considerando unas zonas de control concretas, como pueden ser zonas de agua o zonas de vegetación alejadas de la zona quemada, que a su vez, se compararon con los valores de NDVI de la imagen previa al incendio ($NDVI_{pre}$). El criterio de comparación se basa en que las zonas con muy bajo valor de $NDVI_{pre}$ coinciden con áreas no quemadas según las imágenes obtenidas a través del índice BAI.

Como se comentó en secciones anteriores, se consideró la posibilidad de obtener un producto mejorado mediante la evaluación conjunta de ΔNBR y BAI. Para este fin se creó una máscara de contorno con el área quemada estimada a partir del BAI y se aplicó sobre el resultado de la imagen de ΔNBR . Con ello se mejora la precisión que ofrece el ΔNBR en el cálculo del área y la severidad del incendio. De esta forma se obtiene un producto basado en el ΔNBR que incluye la información proporcionada por el BAI. Se propone designar esta combinación como *Normalized Burned Area* (NBA).

4.1.1. NDVI

Considerando *a priori* que el NDVI debe dar un buen resultado puesto que permite discernir el cambio en la cantidad de vegetación o en su estado provocado por el incendio sobre el ecosistema, se ha comprobado que funciona relativamente bien para detectar, en una primera aproximación, la zona afectada por las llamas, pero no para realizar un cálculo preciso sobre el área total dañada. Partiendo de la afirmación de que no hay ningún índice basado en el uso de las bandas espectrales del visible que ofrezca buenos resultados para calcular el área quemada por un incendio (Escuín

et al., 2008), se detectaron cambios en el NDVI en zonas no afectadas por el incendio, como el agua, o zonas de cultivo alejadas de la masa quemada, que sumado a las altas temperaturas en esta época del año, hace que en dos semanas se detecten grandes cambios en el valor del NDVI. El hecho de que los cambios fueran tan distribuidos a lo largo del mapa tuvo como consecuencia una desviación estándar muy elevada, por lo que no se puede fijar con precisión un valor para discriminar el área quemada del área no quemada.

Utilizando la ecuación 10 para distintos valores de la constante a , se obtuvieron los valores de media y desviación estándar para la diferencia de NDVI, que permite discernir entre área quemada y no quemada, de $0,09 \pm 0,15$. Valores altos de la constante a , cercanos a 2, tienden a subestimar el área quemada, dado que sólo selecciona como área quemada las zonas con muy alta diferencia de NDVI.

Valores de la constante a cercanos a cero, sobrestiman el área quemada, señalando como área quemada zonas fuera de la superficie realmente afectada. Aun así, la estimación de superficie quemada estuvo en torno a las 10.000 ha, sin considerar la posible inclusión de zonas cosechadas.

4.1.2. NBR

Se calculó el índice NBR para las imágenes previa y posterior al incendio. La diferencia de índice permite obtener directamente un área muy bien delimitada de la zona afectada por las llamas. Con esto se pudieron aplicar las condiciones sobre el Δ NBR de la Tabla 1 para discriminar las distintas zonas. Sin embargo y como cabía esperar, los valores de la Tabla 1 no se adaptaron perfectamente a la realidad debido a la diferencia entre ecosistemas para los que se estimaron estos parámetros y la zona de estudio. En la zona mediterránea existen muchos tipos de combustibles (Quílez y Chinchilla, 2013), y justamente en la zona de estudio, se puede apreciar la diversidad.

Del análisis de la Figura 1, se observa que, excepto algunas zonas agrícolas que quedan fuera del área del incendio, se pueden distinguir con bastante claridad los píxeles quemados. Es posible que se esté detectando la siega de algunos campos como incendio. No obstante, se pueden ignorar los píxeles que están fuera de la zona principal. Incluso, variando los criterios aplicados sobre el valor de Δ NBR se puede distinguir entre zonas según su severidad, y los sitios donde ha habido variación de índice positiva.

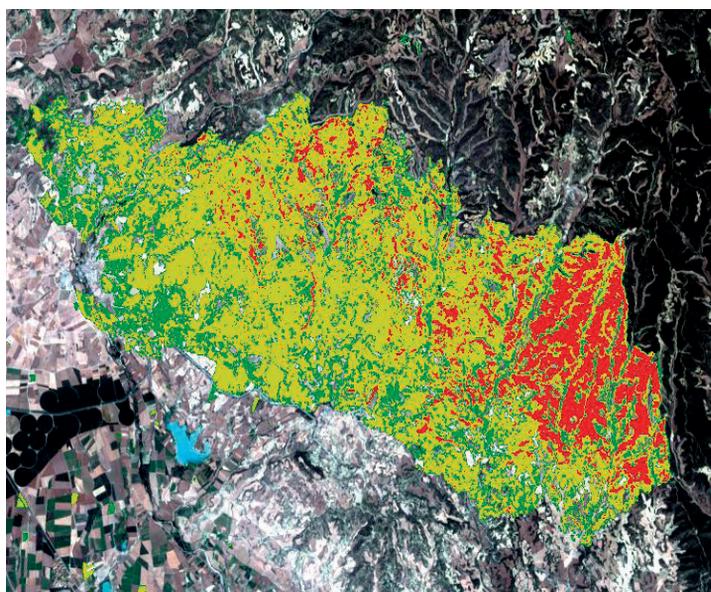


Figura 1. Mapa de severidades obtenido a partir del índice Δ NBR y según los valores de la Tabla 1. Los colores verde, amarillo y rojo corresponden a baja, media y alta severidad, respectivamente.

Se han aplicado los siguientes intervalos para el estudio aproximado de la severidad en función del valor de ΔNBR : Baja severidad entre 0,15 y 0,27; media severidad entre 0,27 y 0,66 y alta severidad a partir de 0,66 (Tabla 1).

Otra forma de proceder que en ocasiones puede dar mejores resultados es la utilización del $\text{R}\Delta\text{NBR}$ y RBR , Ecuaciones 5 y 6. Se observa en la Tabla 2 que la diferencia entre utilizar el ΔNBR y el $\text{R}\Delta\text{NBR}$ o RBR no es significativa (Ecuaciones 4 y 5), por lo que se decidió basarse en el ΔNBR . Los valores pueden consultarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores del área quemada para los distintos índices utilizados

	Área quemada (ha)
NDVI	10.000 ± 1.700
ΔNBR	12.700 ± 200
BAI	13.000 ± 1000
NBA	10.500 ± 200
$\text{R}\Delta\text{NBR}$	12.800 ± 200
RBR	13.000 ± 200

4.1.3. BAI

También se utilizó el índice BAI para calcular el área quemada, utilizando los valores estandarizados, recomendados por Martín y Chuvieco, 2001.

Se aprecia en la Figura 2 que el BAI tiende a sobrestimar el área afectada fuera del área principal que se puede apreciar mediante las variaciones del NDVI y NBR. No obstante, se observa una mayor definición de la zona quemada dentro del área esperada, puesto que algunas zonas interiores que el NBR daba por quemadas, el BAI las descarta. Esto implica la posibilidad de obtener una mayor precisión en el interior del área quemada por medio del BAI.

Dado que el agua presenta una actividad espectral similar a las zonas quemadas, se obtienen unos valores muy altos, por ello, y sabiendo que no es un área afectada por el incendio, se descartaron todos los valores de BAI superiores a 500, quedando un valor medio de BAI de 40 ± 60 . Tras crear varias máscaras, y realizar tanto un análisis visual como un análisis comparativo con los valores previos de NDVI, los valores de BAI que mejor disciernen el área afectada son aquéllos entre 30 y 500.

Se ha comprobado que, efectivamente, las zonas interiores que se identificaban como no quemadas, coinciden con píxeles cuyo valor de NDVI previo está por debajo de 0,30, que se relaciona con escasa vegetación o vegetación agostada.

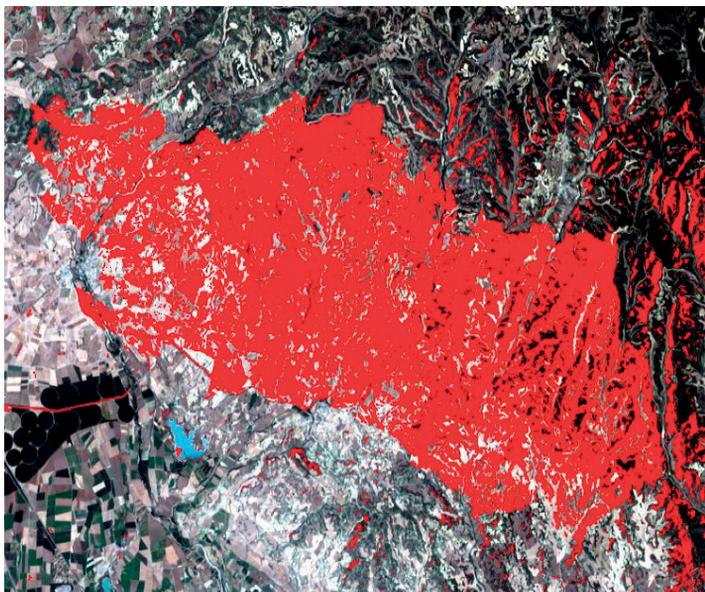


Figura 2. Estimación del área afectada por el incendio obtenida a partir de los valores de índice BAI, entre 0,30 y 500. Se puede apreciar que tiende a sobrestimar el área afectada.

4.1.4. NBA

Como se puede apreciar en la Tabla 2, los errores son mucho más importantes cuando se hace uso del NDVI y BAI. En cambio, los valores de Δ NBR presentan desviaciones estándar mucho menores, debido a que los valores de cada píxel se distribuyen de una forma más uniforme. Llegados a este punto, se propone reunir las capacidades de los índices Δ NBR y BAI en uno sólo, ya que se tendría la precisión en la delimitación del área quemada que ofrece el Δ NBR y el detalle que se puede obtener del interior del área quemada mediante el BAI. Además, la combinación de los dos índices también permite descartar parte de las zonas exteriores que ambos indican como quemadas. Se puede apreciar en la Figura 3.

Dado que ambos índices, NBR y BAI están validados por numerosos trabajos (Martín y Chuvieco, 2001; Escuín *et al.*, 2008), se puede asumir que la combinación de ambos es un resultado aceptable.

No obstante, se puede realizar una validación comparando con los valores previos al incendio de NDVI. *A priori*, se puede esperar que los píxeles con valores bajos de NDVI tengan una cantidad de vegetación menor y por tanto, no ardan, si se considera que un bajo valor de NDVI puede estar asociado a la presencia de tierra o matorrales

dispersos, cuya desaparición no suponen un cambio notable en la actividad fotosintética. Por otro lado, los píxeles con valores más altos de NDVI, pero que a su vez están rodeados de otros con valores bajos, podría darse el caso que las llamas perdieran la suficiente intensidad a medida que se acercaban como para que la vegetación resistiera el calor.

4.2. Estudio de la severidad

Conocida la posibilidad de que los valores de severidad estandarizados no fuesen válidos para la zona mediterránea. Por ello se realizó un estudio de las relaciones obtenidas entre los distintos índices.

Al representar el índice NBA frente al valor de NBR previo, hay una clara tendencia lineal. Sin embargo, hay un cierto número de puntos que se desvía. El valor de NBR de la imagen previa está directamente relacionado con la actividad fotosintética de la vegetación, por tanto, se puede relacionar con la cantidad de vegetación. Así pues, la zona lineal muestra que hay una relación clara entre la cantidad de vegetación previa y el valor de NBA, que nos indica cómo de severo ha sido el incendio. Es decir, hay una correspondencia entre la cantidad de vegetación previa y la severidad

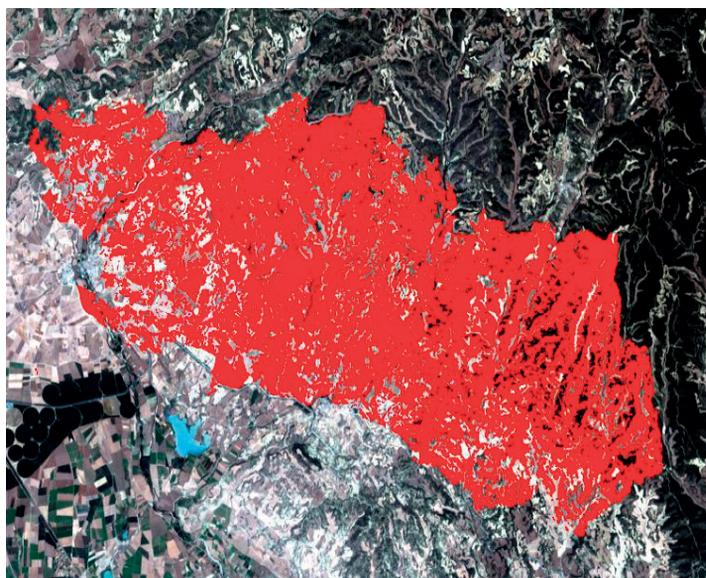


Figura 3. Estimación del área afectada por el incendio obtenida mediante la combinación de Δ NBR y BAI. La combinación de ambos índices descarta zonas que ambos dan por quemadas. En el caso del BAI descarta zonas exteriores, y en el caso del Δ NBR descarta zonas interiores.

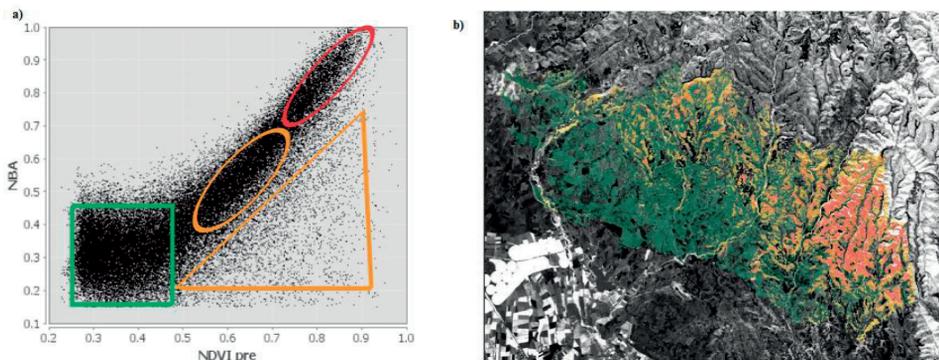


Figura 4. (a) Combinación de Δ NBR y BAI frente al valor de NDVI obtenido a partir de la imagen previa. La relación entre valores bajos de NBA y altos de NDVI indican zonas de media o baja severidad. (b) Valores de baja, media y alta severidad (verde, naranja y rojo) obtenidos a partir del estudio de agrupaciones de píxeles de la imagen (a).

del incendio. Esto mismo se puede observar en la Figura 4, en la cual se representa el mismo valor de NBA frente al NDVI de la imagen previa, que también se interpreta como la cantidad de vegetación. Los valores de los puntos que se alejan de la zona lineal se corresponden con los puntos de contorno que define la superficie quemada, por tanto, se puede determinar que son zonas que presentan una menor severidad.

De forma similar, si se representa el valor de la diferencia de índice NBR frente al valor de NBR de la imagen previa, se obtiene una tendencia similar (Figura 5). Dado que en este estudio no se ha limitado el análisis al área quemada y se ha extendido a su severidad asociada, se pueden distinguir tres zonas con claridad, una zona no quemada, que se corresponde con los valores de Δ NBR alrededor

de cero, una zona de severidad moderada, que se corresponde con los puntos dispersos que se alejan de la zona lineal, y una zona de alta severidad, que se corresponde con aquellos puntos en que la diferencia de NBR aumente de la misma forma que el valor de NBR previo. Si el valor de NBR previo es alto, y la diferencia de NBR también lo es, significa que ha ardido la vegetación completamente. No obstante, por debajo de ciertos valores de NBR_{pre} se deja de considerar que la severidad ha sido alta aunque se haya quemado completamente, ya que para valores bajos de NBR_{pre} no se puede asegurar la cantidad de vegetación existente.

Analizando la Figura 6 se pueden extraer conclusiones similares. Se ha representado el valor del NBR_{post} frente al valor de NBR_{pre} , por tanto, el grupo de puntos que sigue una tendencia lineal se

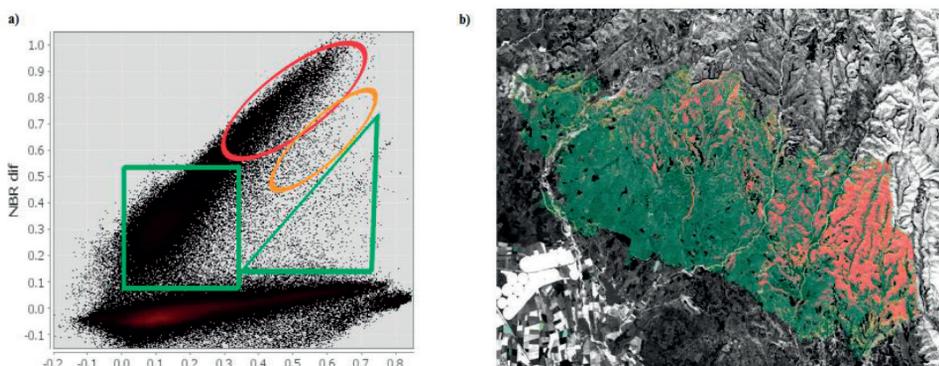


Figura 5. (a) Valores de Δ NBR alrededor de cero corresponden a zonas no quemadas. Valores altos de Δ NBR con alto valor de NBR previo, son zonas de alta severidad. Entre medias, se podría llegar a distinguir entre media y baja severidad. (b) Valores de baja, media y alta severidad (verde, naranja y rojo) obtenidos a partir del estudio de agrupaciones de píxeles de la imagen (a).

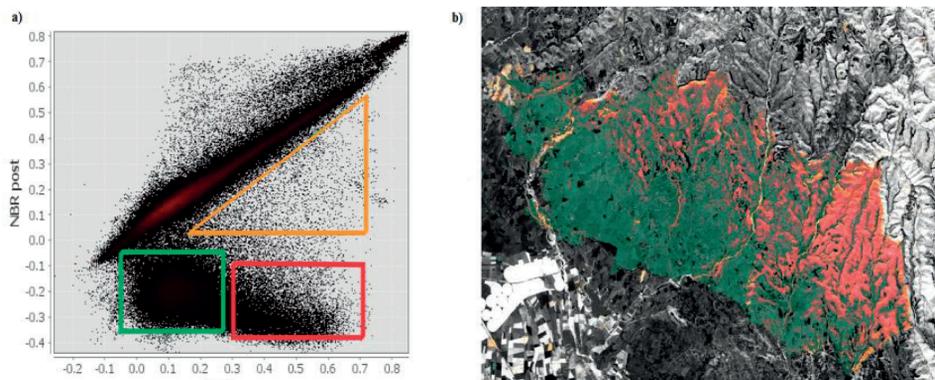


Figura 6. (a) La zona de mayor pendiente se trata de área no quemada. En rojo, alta severidad, donde hay una caída de NBR post incendio respecto al NBR previo. Entre medias, amarillo, media severidad. (b) Valores de baja, media y alta severidad (verde, naranja y rojo) obtenidos a partir del estudio de agrupaciones de píxeles de la imagen (a).

corresponde con la zona no quemada. Por encima de esta zona se tiene una serie de píxeles cuya diferencia de NBR es positiva, éstos se corresponden con zonas de cultivo o zonas forestales en las cuales pudo haber un recrecimiento. Inmediatamente por debajo de la zona no quemada hay puntos cuya severidad de incendio ha sido baja.

Siguiendo el criterio de clasificación de píxeles según su severidad comentado, se puede generar un mapa de severidades para cada caso, que se corresponde con las imágenes b) de las Figuras 4, 5 y 6. Tal y como se puede apreciar en la Figura 4 y teniendo en cuenta los análisis realizados sobre la combinación de índices NBA, se considera que es la imagen que mayor detalle ofrece y más puede aproximarse a lo ocurrido.

4.3. Análisis de zonas interiores

Se realizó un análisis de la vegetación presente en la zona a partir de las definiciones de usos de suelo que se contemplan en el Mapa Forestal Nacional. En la Figura 7, se ha superpuesto el área quemada sobre el tipo de vegetación que ardió. También se aprecia la topografía del terreno, imprescindible para el análisis de las zonas de interés seleccionadas, dentro del área quemada, que se corresponden con 35 áreas que quedaron a salvo.

Se observa que en las zonas 1 y 2, que delimitan el contorno del incendio por el noroeste, que el área quemada se extiende hasta el límite con las zonas de pastizal-matorral. Dada su naturaleza, la época del año, y las altas temperaturas, es de esperar su

mal estado o escasez, confirmado por el valor de NDVI previo en esa zona, cuyos valores medios oscilan entre 0,3 y 0,45, que es un valor bajo con respecto a las zonas adyacentes. Así pues, se intuye que el fuego se extendió por la zona agrícola y de prados artificiales, cuyo valor de NDVI era mayor de 0,5. Topográficamente se determina que el fuego se extendió en sentido ascendente por el barranco. En cuanto a la zona 3, independientemente de la vegetación presente, y pese a corresponderse con tipos de combustible con alta carga inflamable, como matorrales y bosque combinados con zonas de cultivo de prados artificiales, esta zona tiene una pendiente que desciende bruscamente, lo cual lo convierte en una zona de difícil avance para el fuego.

La zona 4 se corresponde con el río Arba de Luesta, que no se quemó, aunque el incendio si paso sobre él. En la siguiente zona, 5, y observando el mapa forestal, se discierne que han ardido los matorrales y que la zona agrícola aparece como no quemada. Esto puede deberse a que fueron cosechados antes del incendio, ya que su NDVI oscilaba entre 0,15 y 0,25, es decir, no había vegetación. Lo mismo se puede decir de las zonas 6, 7 y 8, áreas de topografía plana no quemadas en el interior del incendio y que corresponden a la categoría agrícola y prados artificiales con muy bajo valor de NDVI (ver Figura 7).

De forma similar, las zonas 9 y parte de la 10 corresponden a zonas agrícolas rodeadas de bosque. Sin embargo la zona 10 contiene una depresión que desemboca en un barranco de contenido

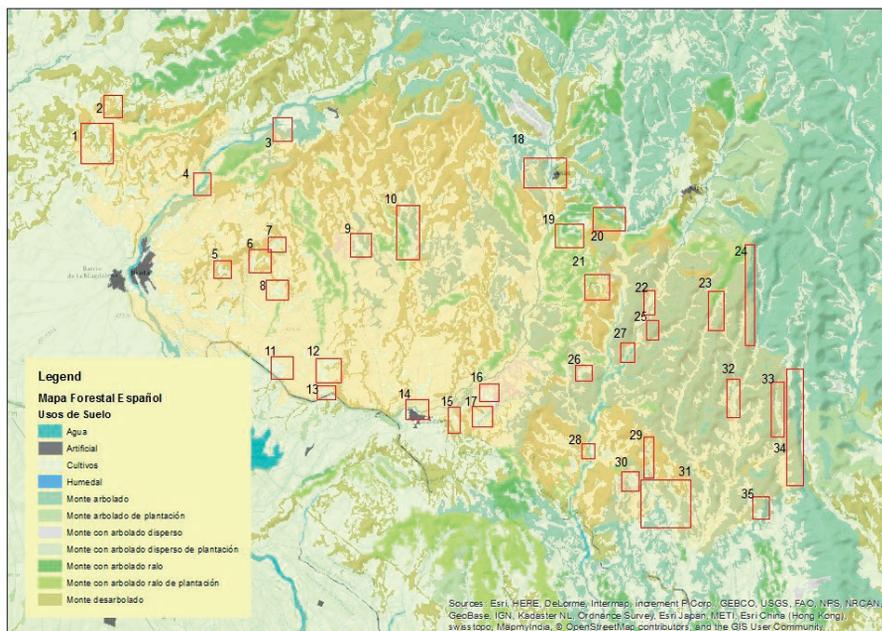


Figura 7. Mapa de usos de suelo obtenido a partir del Mapa Forestal Español (IFN 2006), donde se ha superpuesto el área quemada y se han marcado algunas zonas de interés. Se puede apreciar también la topografía del terreno.

arbolado ralo cuyos valores medios de NDVI eran entre 0,20 y 0,30, por lo que había poca y dispersa vegetación que pudiese quemarse.

Las zonas 11, 12 y 13, coinciden con el límite de contorno del incendio. Topográficamente existe un descenso de altitud en dirección sur, que junto con la carretera, que coincide con el límite del área quemada, crea un punto idóneo para controlar el incendio. El hecho de que el incendio no se extendiera más allá de la carretera se debió a la actuación de los servicios de extinción que trabajaron en el incendio.

El límite 14 pertenece a una población, Farasdués, donde el límite de la vegetación y el hecho de que se considere una zona de prioridad alta debido al peligro para la población, hacen de esta zona un punto de control para el incendio. Así mismo, se considera que la zona 15, de pastizal-matorral, se salvó de las llamas por la actuación de los servicios de extinción, dada su proximidad al núcleo urbano y su linde con las infraestructuras viarias. Las zonas 16 y 17 vuelven a ser zonas agrícolas con un bajo valor de NDVI, lo que contribuye a la disminución de la intensidad de la llama en dirección al límite del incendio.

La zona 18 es una zona de estricto control, al igual que las zonas 19 y 20, para evitar que el fuego rodee la población. Estas dos zonas, tienen una variación negativa en la altitud en el sentido opuesto a la dirección del viento, por lo que se convierte en un buen lugar para controlar el avance.

De igual forma se puede atribuir a la topografía el hecho de que la zona 21 no se haya quemado. Se trata de una zona de monte no arbolada, pero situada en el interior de un barranco con bajo valor de NDVI.

La zona 27 es un río y la zona 22 es una zona que desciende bruscamente hasta la ribera del río, cuyo descenso de cantidad de vegetación hace disminuir la intensidad de llama. Lo mismo sucede con la zona 32. La zona 25 se trata de la zona opuesta, toda la ladera oeste arde mientras que la cima, aunque sea bosque, no se quema. De forma análoga, las zonas 23 y 33 vuelven a coincidir con una área barrancosa donde el terreno desciende bruscamente. Por tanto, el incendio probablemente pasó por encima.

Las zonas 24 y 34 son el límite este del incendio. Es debido a que de nuevo, las llamas encuentran un barranco, esta vez mucho más ancho.

La zona 26 tenía al inicio del incendio un valor máximo de NDVI de 0,36, que dificulta el avance del fuego. De igual modo, la zona 28 es una zona cercana al río con valor máximo de 0,26.

La zona 29 se trata de una depresión barrancosa, y en las zonas 30 y 31 simplemente no había prácticamente vegetación para quemar, ya que el valor medio de NDVI era de 0,31, por lo que se pudo limitar el incendio en esa parte.

La zona 35 es la parte con mayor elevación, seguida de un largo descenso barrancoso. Aunque el valor de NDVI en esta zona era alto, el avance de las llamas se detuvo, debido a que sería una zona de avance lento.

5. Conclusión

En el trabajo se han calculado y comparado tres índices distintos, Δ NDVI, Δ NBR, BAI. Para mejorar la precisión en el cálculo de la superficie quemada se ha propuesto la utilización de la combinación de los dos últimos, NBA. Para ello se ha creado una metodología basada en la combinación de los dos índices espectrales que puede ser extrapolable al estudio de otros incendios, dado que el BAI ofrece un mejor resultado en las zonas interiores porque mide cuánto se acerca el comportamiento espectral de una zona al de aquella recién quemada y, en cambio, el Δ NBR mide la diferencia de reflectividades en el infrarrojo antes y después del incendio, por lo que es más probable obtener falsos positivos en zonas de poca vegetación, debido a cambios en la cubierta ajenos al incendio entre las fechas de estudio.

Para el cálculo de la severidad se ha comprobado que una clasificación sencilla se puede realizar mediante el análisis de la diferencia de índices, previos y posteriores, en función del valor previo de NBR y de NDVI, determinando así zonas claramente diferenciadas.

En general, los datos radiométricos analizados nos indican una severidad general media-alta. Sin embargo, la cantidad de cultivos agrícolas y prados artificiales hace sospechar que haya zonas donde la severidad haya sido realmente más baja.

A tenor de estos resultados, y puesto que el análisis se ha realizado íntegramente desde el gabinete, se recomienda la realización de una evaluación de campo post-incendio cercana en el tiempo para

una correcta calibración del método de cálculo de la severidad de un incendio, así como un análisis a largo plazo para su validación. De igual forma, se hace necesario la aplicación de esta metodología en otras áreas para dotarla de un carácter estadístico.

6. Agradecimientos

El autor principal desea mostrar su agradecimiento a la empresa Geopixel, S.L., por la desinteresada ayuda prestada por medio de David Vinué, que ha ofrecido el marco idóneo para iniciar el trabajo y continuar en su investigación; a Héctor Espinós, doctor en Física y miembro del Institute of New Imaging Technologies de la Universidad Jaume I, por sus consejos y revisiones, y a Raúl Quilez, Jefe del Consorcio de Bomberos de Valencia, por su aportación a la discusión del asunto. Finalmente, quiere agradecer el apoyo recibido por parte del Grupo de Teledetección Térmica de la Universitat de València.

Referencias

- AccuWeather. Último acceso: 1 de Mayo, 2016. de <http://www.accuweather.com>.
- AEMET. Agencia Estatal de Meteorología. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://www.aemet.es>.
- AESPI. El incendio más grave en 20 años consume 13500 ha en sierra de Luna, Aragón. *AESPI*. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://www.tecnifuego-aespi.org>
- Ariza, A. 2013. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM. Knowledge Portal, UN-SPIDER. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://www.un-spider.org>
- Balbi, J. H., Morandini, F., Silvani, X., Filippi, J. B., Rinieri, F., 2009. A physical model for wildland fires. *Combustion and Flame*, 156(12), 2217- 2230. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.07.010>
- Base de datos meteorológica. DatosClima. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://datosclima.es>.
- Bisquert, M. 2011. Una metodología para la estimación del riesgo de incendio empleando imágenes del sensor MODIS/TERRA. Valencia: Universidad de Valencia.
- Chuvieco, E. 2009. Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 173-181.

- Chuvieco, E. 1996. *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Ediciones Rialp.
- 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, 189-198. <https://doi.org/10.1071/WF04010>
- E.F.E. 2015. El incendio de Luna arrasa ya casi 13500 hectáreas y se controla por zonas. *Diario abc*. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://www.abc.es>.
- Escuín, S., Navarro, R., Fernández, P. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Difference) 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>
- Gómez, I., Martín, M. P. 2006. Estudio comparativo de índices espectrales para la cartografía de áreas quemadas con imágenes MODIS. *El Acceso a la Información Espacial y las Nuevas Tecnologías Geográficas*, 883-894.
- Hantson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., More, G., Cristóbal, J., Peces, J.J., Tejero, J.A. 2011. Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36, 51-61. Último acceso: 16 de noviembre, 2017, de http://www.aet.org.es/revistas/revista36/Numero36_05.pdf
- Instituto Aragonés de Estadística. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://www.aragon.es>.
- Karl, J. Normalized Burn Ratio. The Landscape ToolBox. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://wiki.landscapetoolbox.org>.
- Key, C. H., Benson, N. C. 1999. Measuring and remote sensing of burn severity. In *Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop*, II, 15-17.
- L.M.G., F.M.H., 2016. Imputado un agricultor por el incendio de Luna. *El periódico de Aragón*. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://www.elperiodicodearagon.com>.
- Laclaustra A., Martínez S., Quintero E., Piñeros W., Chuvieco E. 2003. Comparación de distintas técnicas para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+. *Revista internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 3, 216-234.
- Martín, M. P., Chuvieco, E. 2001. Propuesta de un nuevo índice para cartografía de áreas quemadas: aplicación a imágenes NOAA-AVHRR y LANDSAT-TM. *Revista de Teledetección*, 16, 57-64. Último acceso: 16 de noviembre, 2017, de <http://www.aet.org.es/revistas/revista16/AET16-10.pdf>
- Martínez E., Rubio E., López F. R., Dadi T., Andrés M., Morote A., Lucas M. E., Candel D. 2013. Evaluación de la severidad mediante imágenes Lansat y validación con datos de campo en el incendio del Monte 'Ensanche de Las Majadas'. Sociedad Española de Ciencias Forestales: Vitoria.
- Mattar, C., Santamaría, A., Durán C. 2012. Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección. *Revista de Teledetección*, 38, 36-50. Último acceso: 16 de noviembre, 2017, de http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_04.pdf
- 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, 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, 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>
- Montorio, R., Pérez, F., García, A., Vlassova, L., de la Riva, J. 2015. La severidad del fuego: Revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: Homenaje al profesor José María García-Ruiz*, 427-440.
- Navarro, C. 1991. Uso de imágenes Landsat-TM en un sistema de evaluación de daños causados por incendios forestales. *Teledetección y Medioambiente (Actas de la IV reunión científica de la Asociación Española de Teledetección)*, 51-59
- Parks, S. A., Dillon, G. K., Miller, C. 2014. A new Metric for Quantifying Burn Severity: The Relativized Burn Ratio. *Remote Sensing*, 6, 1827-1844. <https://doi.org/10.3390/rs6031827>
- Pettinari, M. L., Chuvieco, E. 2015. Cartografía de combustible y potenciales de incendio en el continente africano utilizando FCCS. *Revista de teledetección*, 43, 1-10. <https://doi.org/10.4995/raet.2015.2302>

- Pérez, F., de la Riva, J. 1998. El empleo de imágenes Landsat TM para la detección y cartografía de áreas incendiadas en el Prepirineo Occidental Oscense. *Geographicalia*, 36, 131-145. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1998361684
- Quilez, R., Chinchilla, S. 2013. Modelos de combustible en la provincia de Valencia. Sociedad Española de Ciencias Forestales: Vitoria.
- Robinson, J. G., Bodmer, R. E. 1999. Toward wildfire management in tropical forests. *Wildfire Manage*, 63, 1-13. <https://doi.org/10.2307/3802482>
- Santis, A., Chuvieco, E. 2009. A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing Environment*, 113, 554-562. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.011>
- Smith, B., McDemird G., 2014. Examination of Fire-Related Succession Within the Dry Mixed-Grass Subregion of Alberta With the Use of MODIS and Landsat. *Rangeland Ecol Manage*, 67:307-317. <https://doi.org/10.2111/REM-D-13-00078.1>
- Subdirección General de Silvicultura y montes 2006. Tercer Inventario Forestal Nacional. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://www.magrama.gob.es>.
- USGS. EarthExplorer. Último acceso: 1 de Mayo, 2016, de <http://earthexplorer.usgs.gov>
- Varesa, Grupo, 2007. Plan de Prevención de Incendios Forestales de la Demarcación de Polinyà del Xúquer. Valencia: Generalitat Valenciana.
- Viedma, O., Chuvieco, E., 1994. Cartografía y evaluación de daños causados por incendios forestales mediante técnicas de teledetección. El ejemplo de Hoya de Buñol (Valencia). *AITIM, Boletín de información técnica* 167, 60-66.